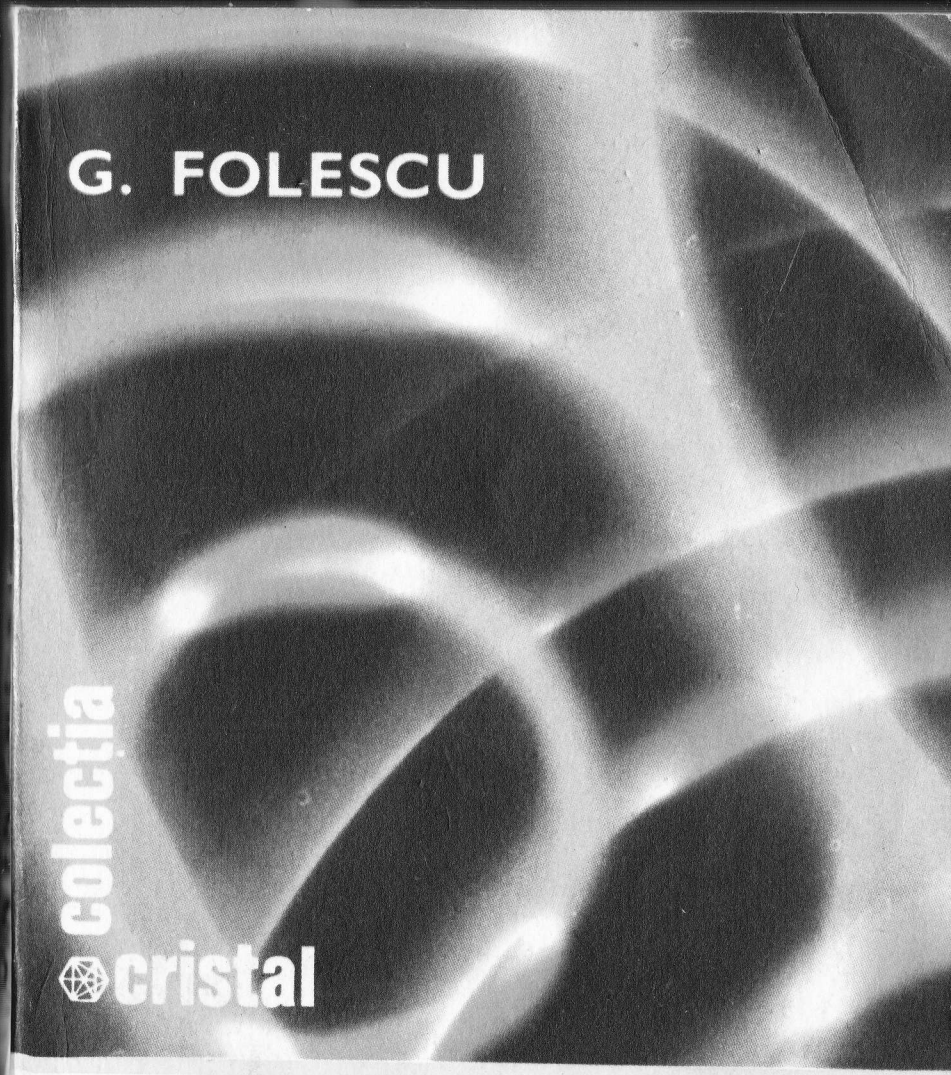


G. FOLESCU

colecția cristal

DIN ENIGMELE MICROCOSMOSULUI

EDITURA ALBATROS

918/12L
752828

Volumul prezintă spectaculoase descoperiri şi ipoteze din lumea microcosmosului. Printre temele cuprinse în lucrare pot fi menţionate: „Particulele elementare nu sînt chiar... elementare", „Pînă unde se poate ajunge cu diviziunea substanţei?", „Quarkurile sau rishonii — ultimele particule elementare?", „Palpitanta descoperire a bosonului vector intermediar", „Forţa de culoare — cea mai puternică forţă din Univers?", „Bosonul lepto-quark — un vînat preţios!", „Antimateria — vecina noastră în Univers?", „Superstringurile promit împlinirea visurilor fizicienilor — marea unificare a forţelor naturii".

colecţia cristal

Lei 15,50

Volumul de față încearcă să prezinte strădaniile inteligenței umane de a pătrunde din ce în ce mai adînc în cunoașterea structurii materiei. Pornind de la aspirațiile filozofilor greci de a reduce lumea materială la cîteva elemente fundamentale, apoi, însoțindu-i pe fizicienii și chimiștii unor timpuri nu prea îndepărtate de noi cu euforia lor în fața ușii întredeschise a lumii atomului, se ajunge, în final, din nou, în fața chinuitoarei speranțe de a găsi un răspuns la întrebarea veche de peste 25 de secole: din ce este făcută lumea materială?

Elaborarea materialului a fost făcută în intenția de a-l conduce pe cititor prin principalele etape ale evoluției cunoașterii microcosmosului, de la descoperirea atomului, pînă la ultimele ipoteze în legătură cu particulele elementare. În multe cazuri a fost necesar să fie prezentate concepte aparținînd unei anumite etape a dezvoltării științei, cu terminologia respectivă, ajungînd, treptat, o dată cu apariția de noi fapte și date, la definiții și interpretări contemporane.

Sperăm că cititorii, care urmăresc povestirea de față, vor avea, în final, o imagine a frontierelor la care a ajuns fizica modernă, lăsînd viitorului sarcina de a decanta ipotezele prezentate.

Capitolul 1

CE ESTE SUBSTANȚA?

La început au fost filozofii

Primul om care a încercat să-și imagineze originea tuturor lucrurilor din jurul său, și despre care există dovezi, a fost filozoful Tales din Milet. El a trăit în Ionia (Asia Mică) între anii 624—548 î.e.n. și se spune că era ceea ce numim noi azi inginer, om politic, magistrat, geometru și priceput om de afaceri. El este considerat a fi inițiatorul filozofiei grecești, deoarece a fost primul care a atacat problema naturii lucrurilor și tot el ar fi fost primul care a încercat să dea o explicație bazată pe organele de simț ale omului.

La întrebarea care și-a pus-o, de a afla elementul primar ce se află la originea tuturor lucrurilor, și care, prin transformări, dă naștere la toate fenomenele din Univers, el a dat un răspuns simplu: apa.

Răspunsul lui Tales nu era dat la întîmplare. Explicația sa o susținea astfel: semințele germinează în umiditate și toată hrana folosită de plante și animale este de asemenea umedă. Apa dă naștere la gheață, iar prin aluviunile rîurilor se consolidează ca sol; prin evaporare devine aer, iese din adîncurile pămîntului sub formă de izvoare și cade din nori sub formă de ploi...

Această concepție asupra existenței unui element primar, curajoasă pentru vremea sa, prin care preconiza că din punct de vedere calitativ substanța pe Pămînt este unică, constituie unul dintre meritele principale ale lui Tales. Drumul deschis de el a devenit un mare cîmp de studiu al filozofilor greci.

Continuatorii lui Tales au fost Anaximandru și Anaximene. Întrucît ideile lui Tales permiteau oricîte speculații teoretice, fiecare filozof căuta noi elemente care, după motivările personale, ar răspunde mai exact la întrebarea asupra naturii lucrurilor.

Anaximandru (610—547 î.e.n.) nu mai considera corectă părerea lui Tales, că apa ar fi substanța primară, ci el susținea că la originea tuturor lucrurilor stă infinitul, nedeterminatul (apeiron). Azi se consideră că în teoria lui Anaximandru se manifestă tendința sa de a ieși din lumea concretă din jurul său, eliberîndu-se de limite, bazîndu-se pe o categorie de materie difuză, care nu numai că este infinită cantitativ, ci și divizibilă la infinit.

Ideea materiei primare la originea tuturor lucrurilor a fost menținută și în alte tentative ale filozofilor vremii, sugerîndu-se alte substanțe nu atît de concrete și limitate, dar care satisfăceau condițiile infinității: focul pentru Heraclit și aerul pentru Anaximene.

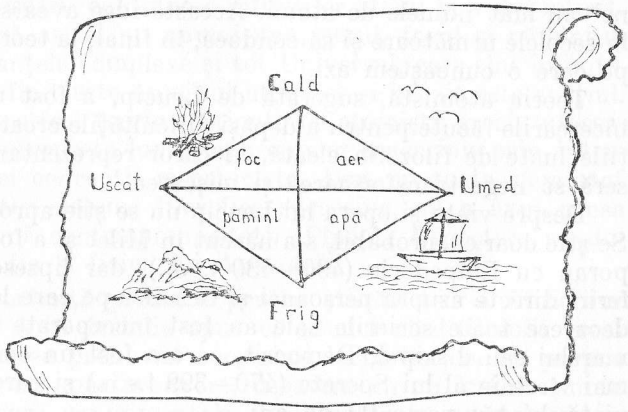


Fig. 1. Originea tuturor lucrurilor pe timpul lui Empedocle din Agrigento (sec. V î.e.n.).

Dar premisele folosite de filozofii greci au ajuns, la un moment dat, prin speculații logice, la concluzii prin care să nege realitatea. Au rămas totuși filozofi care acceptau realitatea sensibilă și printre aceștia se poate remarca Empedocle din Agrigento (490—430 î.e.n.), care afirmă că la originea tuturor lucrurilor stau 4 elemente: focul, aerul, apa și pămîntul. De asemenea, Anaxagora din Clazomene (500—428 î.e.n.) spunea că materia rezultă dintr-un amestec de calități nenumărate, care nu sînt aparente, dar care există: umed, uscat, frig, cald, obscur, luminos etc.

Cum gînditorii de atunci nu duceau lipsă de idei, mai poate fi remarcată o direcție, susținută de anumiți filozofi,

care pornea de la premisa că materia primară este unică, lipsită de calități și impenetrabilă (cum susținea Parmenide), dar că nu este compactă: ea ar fi divizată în multe părticele de mărimi și forme diverse, care se mișcă în „gol" (vid). Despre acești filozofi, Aristotel spunea că ei susțineau: „...Plinul nu e unul singur; dimpotrivă, există o infinitate de „corpuri pline", care din cauza micimii lor sînt invizibile. Acestea se mișcă în vid și prin reunirea și separarea lor produc generarea și distrugerea tuturor lucrurilor" *(Cartea I. Despre generații)*.

Oricare din aceste corpuri erau „pline", deci indivizibile; iar de la cuvîntul grecesc *atomos* (indivizibil), „corpurile pline" au luat numele de atomi. Această idee avea să continue în secolele următoare și să conducă, în final, la teoria atomică pe care o cunoaștem azi.

Teoria atomistă, sugerată de Leucip, a fost una dintre încercările făcute pentru a depăși dificultățile create de direcțiile luate de filozofia eleată, ai căror reprezentanți ajunseseră să nege transformarea și mișcarea.

Despre viața și opera lui Leucip nu se știe aproape nimic. Se știe doar că, probabil, s-a născut în Milet și a fost contemporan cu Empedocle (490—430 î.e.n.), dar lipsesc orice referiri directe asupra persoanei și teoriilor pe care le susținea, deoarece toate scrierile sale au fost încorporate în operele marelui său discipol, Democrit, care a fost un contemporan mai vîrstnic al lui Socrate (470—399 î.e.n.) și care a avut o viață lungă: peste 90 de ani.

Democrit s-a născut în Abdera, o colonie grecească din Tracia. Cunoștea gîndirea filozofică și științifică atît a predecesorilor săi, cît și a contemporanilor. „Se pare că el a studiat totul" — avea să scrie despre el Aristotel. Lui i se atribuie lucrări de fizică, de logică și teoria cunoașterii, de matematică și astronomie, de muzică și probleme de literatură, de medicină, de botanică și zoologie, de problemele orientului și de tehnica războiului.

Se știe că teoria atomistă a fost sugerată de Leucip și apoi a fost reluată și dezvoltată de Democrit. Cu mici excepții, nu se disting deosebiri între gîndirile celor doi filozofi. mai ales în ceea ce privește concepția atomistă a materiei,

Potrivit teoriei atomiste susținute de Leucip și Democrit, care au pornit de la ipoteza existenței unui singur element primar, toate lucrurile sînt constituite din părticele reale

indivizibile (atomi) și din vid. Atomii sînt formați toți din aceeași materie și diferă între ei prin dimensiuni și prin formă. Ei sînt indivizibili nu numai pentru că sînt extrem de mici (trebuie să fie așa deoarece în substanțe sînt imperceptibili), ci deoarece nu conțin vid. Astfel, principiile tuturor lucrurilor sînt: plinul (atomii) și vidul. Atomii au o compoziție identică, dar forme și dimensiuni diferite, ei se mișcă necontenit în toate direcțiile prin vid, cu o mișcare care nu a fost generată și care este eternă. Cînd atomii se grupează împreună într-un „vîrtej" formează lucrurile, iar cînd aceștia se îndepărtează unii de alții lucrurile se dizolvă; astfel corpurile se transformă (doar aparent ele se nasc și se distrug) datorită mișcării continue a infiniților atomi în vidul infinit. Se formează astfel nu numai apa, aerul, focul și pămîntul, ci și substanțele complexe și tot Universul, care sînt infinite, deoarece infinit este numărul atomilor și infinit este spațiul.

Aceasta a fost teoria susținută de atomiștii greci, o încercare de a interpreta lumea aparențelor senzoriale prin intermediul unei concepții mecaniciste. Dar, cu toate că a stat la baza altor sisteme filozofice succesive, nu a avut șansa să se impună contemporaneității. Pînă la Renaștere va domina filozofia și fizica lui Aristotel.

Ce importanță prezintă pentru știință teoria filozofilor greci? Mai întîi trebuie spus că atunci cînd filozofii greci abordau marea problemă a originii lucrurilor, ei au propus teorii care azi apar arbitrare, deoarece nu au fost susținute de nici o bază experimentală. Unii susțin că acest lucru se datora și unei atitudini sociale: în societatea Greciei antice, munca manuală, nedemnă pentru oameni liberi, era făcută numai de sclavi. Un filozof gîndea, teoretiza sau discuta și era de neconceput să se dedice unui lucru manual (experiment) rezervat sclavilor.

Dar chiar în aceste condiții, teoriile atomiștilor greci au o valoare enormă: pentru prima dată omul încearcă o explicație asupa lumii, liberă de prejudecăți și de superstiții. Filozofii ionici au fost primii care au recunoscut că lumea nu era doar o scenă pe care jucau arbitrar spiritele și zeii, ci era ceva ce putea fi înțeles, dacă cineva se dedica studiului naturii. Acești filozofi au avut marele merit de a fi fost curioși și de a fi știut să fie surprinși; or, acestea sînt două trăsături fundamentale ale atitudinii științifice.

Astfel, cu un efort de gîndire și imaginație, care azi e dificil să fie prețuit la întreaga sa valoare, spiritul elenic ajunsese la ideea care azi am putea-o numi „metodă științifică": încercarea de a explica fenomenele complicate și aparent diverse pe care le oferă natura, cu ajutorul cîtorva fenomene simple care se supun unor legi generale.

În zilele noastre, cînd se pune întrebarea cum de a fost posibil că teoria atomistă — sugerată și dezvoltată de Leucip și Democrit în secolul al V-lea î.e.n. — a trebuit să aștepte două milenii pînă să fie pusă în valoare, nu trebuie să se uite ceea ce s-a mai menționat, că grecilor le lipsea știința experimentală: teoriile lor erau abstracte. De aceea, opțiunea pentru una sau alta din teoriile existente era arbitrară. S-a impus cea care avea susținători mai abili.

Teoria atomistă a fost readusă la lumină după Renaștere, pe o cale destul de ocolită. După ce a fost combătută și discreditată de Aristotel, modificată de Epicur (342—270 î.e.n.), poetul roman Lucrețiu (Tito Lucrezio Caro) (95—55 î.e.n.) a ridicat-o la lumină în poemul său *De Rerum Natura.*

O sistematizare genială

Printre primii gînditori ai Evului mediu, care au susținut ideile teoriei atomiste, întîlnim pe Giordano Bruno (1548—1600), apoi pe Francis Bacon (1561—1625) — care deși a criticat doctrina lui Democrit, a susținut o teorie corpusculară — și Galileo Galilei (1564—1642), care a acceptat teoria atomistă, dîndu-i și o descriere succintă și clară.

În aceeași perioadă, P. Gassendi (1592—1655), pe baza anticei teorii a lui Epicur, se pare, a fost primul care a recunoscut că multe din proprietățile gazelor se pot explica foarte simplu, dacă se iau în considerare mișcările măruntelor părticele constituente.

Isaac Newton (1642—1727), reluînd ideile lui Gassendi, a notat în *Optica* sa: „mi se pare probabil că materia este formată din particule solide, ponderabile, dure, impenetrabile, mobile... și că aceste părticele primare, fiind solide, sînt incomparabil mai dure decît oricare alt corp poros din același compus, atît de dure încît nu mai pot fi distruse sau fărîmițate".

Și astfel, încetul cu încetul, cu ezitări și ocolișuri, ipoteza atomistă a răzbătut peste secole. Abia la începutul secolului

al XIX-lea a început să se impună, dovedindu-se necesară pentru explicarea unor constatări experimentale.

De fapt, teoria atomistă a pătruns în lumea științei pe două direcții. Pe de o parte, o formulare a acesteia era legată de explicarea unor legi care guvernau fenomenele fizice, iar pe de altă parte, pe baza ipotezei că substanța are o structură atomică, au fost interpretate mecanicist fenomenele termice, ajungîndu-se la formularea teoriei cinetice a gazelor. De aici se vede tendința caracteristică a științei secolului al XIX-lea, care își propunea să folosească ipoteza atomistă doar în acele fenomene care sînt accesibile experienței, adică un domeniu restrîns, spre deosebire de grecii antici și de alte popoare din antichitate, al căror scop era să găsească o formulă unică în care să sintetizeze toate cunoștințele. Un învățat grec trebuia să aibă un răspuns la orice întrebare, pe cînd omul de știință modern, înarmat cu aparatură adecvată experiențelor, se dedică unor probleme bine delimitate.

Pe la începutul secolului al XVIII-lea, chimiștii au început să-și dea seama cu precizie ce este un corp pur, chimic identificabil, au început să deosebească corpurile simple, adică pe cele care nu mai pot fi descompuse prin metode chimice, constituenții (elementele) corpurilor compuse și chiar presupuneau că numărul corpurilor simple este mult mai mic față de enorma multitudine a corpurilor compuse.

Secolul al XVIII-lea a fost totodată și un secol în care descoperirile matematice au luat o mare amploare. Unele dintre teoriile matematicii, corelate cu ipoteza că substanța are o natură corpusculară, au fost aplicate unor fenomene fizice: adeziunea, coeziunea și capilaritatea. Ca model pentru noile teorii s-a folosit modelul mișcării planetelor elaborat de Newton, particulele de substanță fiind considerate puncte materiale (avînd masă), care ascultau de legile mecanicii. De aceea, noile teorii erau mecaniciste și corpusculare.

Gîndirea atomistă mecanicistă a secolului al XVIII-lea a reînnoit revoluționar ideile asupra structurii corpurilor și a transformărilor acestora. Pe aceste baze, Laplace (1749—1827) elaborează teoria fenomenelor de capilaritate, apoi Bernoulli (1700—1781), în 1738, sugerează teoria cinetică a gazelor, care permite verificarea precisă a legilor gazelor, găsite prin experiență.

În chimie, Lavoisier (1743—1794) a dat științei un instrument fundamental pentru progres: legea conservării masei în procesul reacției chimice. O noutate pentru chimie o reprezintă acum *introducerea conceptului de măsurători cantitative*, iar chimiștii, înarmați cu balanțe de precizie, studiază atent masele substanțelor care participă în combinațiile chimice.

A devenit celebră o dispută legată de măsurătorile cantitative. Deși metoda era precisă, imprecizia instrumentelor a dat naștere unei polemici răsunătoare. Este vorba de polemica dintre chimiștii Berthollet și Proust, care a durat opt ani. Avînd cîștig de cauză, Proust enunță, în 1799, *legea proporțiilor constante*, în care afirmă că un corp chimic conține totdeauna aceleași elemente combinate împreună în aceleași proporții. De pildă, la obținerea apei, pe orice cale s-ar face aceasta, o anume masă de hidrogen se combină totdeauna cu o masă de oxigen de opt ori mai mare.

În legătură cu această lege, Proust afirma: „Un compus este o substanță căreia natura i-a conferit rapoarte fixe; și, pe scurt, este o stare pe care natura o creează cu balanța în mînă".

Sfîrșitul secolului al XVIII-lea se caracterizează printr-un nivel destul de avansat al cunoștințelor în condițiile în care exista doar ipoteza constituirii corpurilor din atomi. Aceste acumulări de cunoștințe au permis ca ipoteza atomistă să se transforme într-o teorie științifică — teoria atomică.

Pentru știință rămîne o dată memorabilă ziua ce 21 octombrie 1803, cînd fizicianul Dalton citește în fața Societății literare și filozofice din Manchester memoriul său, în care, pentru prima dată, expune principiile fundamentale ale teoriei sale atomice. Apoi Dalton și-a popularizat teoria în lecțiile pe care le-a ținut în fața studenților, iar peste cinci ani, în lucrarea sa *Un nou sistem al filozofiei chimice* a demonstrat cum ipoteza atomică a permis explicarea legilor lui Lavoisier și a lui Proust și cum, totodată, constituie un instrument incomparabil pentru studiul fenomenelor chimice. În aceeași perioadă, Dalton, pe baza unor experiențe migăloase, elaborează *legea proporțiilor multiple*.

O caracteristică importantă a teoriei atomice a lui Dalton, și care o deosebește de alte ipoteze atomiste anterioare, o constituie criteriul pe baza căruia a fost elaborată: pentru prima dată este introdusă în chimie ideea *masei atomice*.

După Dalton, substanța este constituită din părticele minuscule, omogene — atomii —, care își conservă individualitatea în toate procesele chimice. Fiecare element chimic (element însemnînd orice corp simplu care nu mai poate fi descompus pe cale chimică) e alcătuit dintr-un tip particular de atomi; toți atomii unui același element sînt egali între ei și au toți aceeași masă invariabilă. Elementele diferite au, respectiv, atomi de mase diferite. Deci, fiecare element este caracterizat prin masa atomului său.

Dalton scrie în cartea sa: „Unul dintre scopurile principale ale lucrării mele este de a arăta importanța și avantajul la determinarea fie a masei relative a ultimelor părticele ale corpurilor simple și ale compușilor, precum și numărul părticelelor simple, elementare, care constituie o părticică compusă și încă numărul de părticele mai puțin compuse care intră în componența unei părticele mai mult compuse".

Iar apoi: „Dacă două corpuri, A și B, sînt dispuse a se combina, iată care sînt combinațiile care pot avea loc, începînd cu cele mai simple:

1 atom din A + 1 atom din B = 1 atom din C (binar)
1 atom din A + 2 atomi din B = 1 atom din D (ternar)
2 atomi din A + 1 atom din B = 1 atom din E (ternar)
1 atom din A + 3 atomi din B = 1 atom din F (cuaternar) etc.

Iată cum, cu deosebită simplitate, Dalton a arătat cum teoria atomică justifică legea conservării masei a lui Lavoisier, legea proporțiilor constante a lui Proust precum și legea enunțată de el, a proporțiilor multiple, în care afirmă că „atunci cînd se combină două elemente pentru a forma mai mult de un compus, diversele mase ale unuia care se combină cu o aceeași masă din celălalt, se află între ele în rapoarte de numere întregi și simple, adică în raportul 1 : 2 : 3..." De pildă, atunci cînd oxigenul se combină cu azotul, poate da loc la cinci oxizi de azot diferiți. În acești oxizi, masele de oxigen care se combină în 100 părți de azot sînt, respectiv: 57, 114, 171, 228, 285, fiind între ele în raport cu numerele 1 : 2 : 3 : 4 : 5 (adică toate sînt divizibile cu primul din serie, 57).

Această contribuție adusă științei de mintea ordonată și logică a lui Dalton este considerată de o excepțională valoare, asigurîndu-i un loc predominant în istoria gîndirii științifice. Desigur, drumul i-a fost oarecum netezit de predecesori,

printre care Lavoisier avea o contribuție remarcabilă. De altfel, de multe ori în știință, la un anumit moment, suma rezultatelor experimentale face să „plutească în aer" elementele unei noi teorii. Nu poate fi contestat nici meritul celui care reușește, dialectic, să sintetizeze toate acumulările cantitative, prin saltul calitativ pe care îl constituie noua teorie.

Dalton a admis în teoria sa că un element este constituit din minuscule particule de substanță, *atomi*, egale între ele și că diversele elemente sînt alcătuite din atomi de mase diferite; dar el admitea că și elementele în stare liberă (adică atunci cînd nu sînt combinate) sînt toate alcătuite din atomi separați. De pildă, hidrogenul ar fi constituit din atomi separați de hidrogen, oxigenul din atomi separați de oxigen etc. În schimb, compușii sînt formați din *molecule*, fiecare din ele fiind alcătuite din atomi ai elementelor componente. Astfel, o moleculă de apă ar fi alcătuită dintr-un atom de hidrogen și un atom de oxigen. Deci pentru Dalton conceptul de moleculă se referea doar la compuși, în timp ce pentru elemente cele două noțiuni, „molecule" și „atomi", erau echivalente.

Lege chimică stabilită de un jurist

Acceptînd ipoteza lui Dalton, chimiștii s-au văzut curînd în fața unor dificultăți ce păreau insurmontabile; anume, o nouă lege descoperită de Gay-Lussac, în 1808, a demonstrat că rezultatele experiențelor se află într-un dezacord total cu ipoteza lui Dalton. Legea lui Gay-Lussac afirmă că în reacțiile chimice la care iau parte gaze, volumele elementelor care reacționează și volumele produselor rezultate (toate măsurate la aceeași presiune și la aceeași temperatură) se află între ele în rapoarte care se exprimă prin numere întregi simple.

Impasul a fost înlăturat în 1811 de juristul italian și chimist amator, Amedeo Avogadro (1776—1856). Referindu-se la rezultatele lui Gay-Lussac, Avogadro a ajuns la concluzia că, dacă se consideră un gaz ca fiind un ansamblu de părticele elementare, sau molecule, independente unele față de altele, atunci trebuie să se admită că: „în condiții identice de temperatură și presiune, volume egale de gaz,

simplu sau compus, conțin același număr de molecule". (Prin moleculă el înțelege cea mai mică masă dintr-o substanță capabilă să existe independent). Această afirmație, făcută de altfel intuitiv, a primit numele de *legea lui Avogadro.*

Lui Avogadro îi revine meritul de a fi primul care face o distincție precisă între conceptele de *moleculă* și *atom* și, contrar lui Dalton, admite că elementele gazoase nu sînt totdeauna alcătuite numai din atomi, ci unele dintre ele (hidrogenul, oxigenul, clorul, azotul etc.) sînt alcătuite ca și compușii, din molecule. Dar în timp ce moleculele elementelor sînt alcătuite din atomi identici, moleculele compușilor sînt formate din atomi diferiți și anume din atomii elementelor care sînt combinate.

Iată, de pildă, cum se poate reprezenta combinația hidrogenului (care are moleculele formate din doi atomi: H_2) cu oxigenul (a cărui moleculă este, de asemenea, constituită din doi atomi: O_2) din care rezultă apa (H_2O).

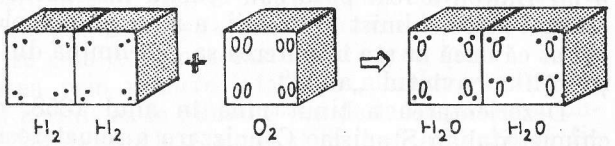


Fig. 2. Molecula de apă.

Deci, moleculele elementelor pot fi constituite dintr-un singur atom, ori din doi, trei etc. atomi identici. De pildă, molecula de potasiu este *monoatomică* (are un singur atom), moleculele de hidrogen, oxigen, clor etc. sînt *biatomice* (au cîte doi atomi) etc. Se poate observa deci că și la elemente se poate face distincție între atomi și molecule.

Abia după ce teoria lui Dalton a fost completată cu precizările aduse de Avogadro, chimia a avut la dispoziție toate datele necesare pentru a construi un sistem coerent de formule, prin care să se reflecte alcătuirea unui corp.

Legea lui Avogadro a avut un destin cel puțin ciudat. Deși a pus la dispoziție un mod de a determina corect masa relativă a atomilor și proporțiile prin care aceștia intrau în combinații, legea lui Avogadro s-a lovit de indiferența sau poate de neînțelegerea chimiștilor. Nici republicarea legii,

după cîțiva ani, nu a avut mai mult succes în lumea cercetătorilor, poate fiindcă nu luau în serios o lege stabilită de un chimist amator. Dar cînd chimiștii s-au pus la lucru pentru a determina masele relative ale elementelor cunoscute (în comparație cu masa atomică a hidrogenului considerată ca unitate) au întîlnit mari dificultăți. Și aceasta deoarece nici unul n-a ținut cont de precizările făcute de Avogadro.

Situația a durat peste 50 de ani, timp în care dificultățile au crescut într-o asemenea măsură, încît s-a ajuns la un adevărat haos formularistic. Una și aceeași formulă putea indica trei substanțe diverse, în funcție de opțiunea pentru o anume teorie; de asemenea, existau trei tabele de mase atomice, cu corespondențele respective la formele compușilor, la mecanismele reacțiilor etc. Dezvoltarea diverselor ramuri ale chimiei devenea din ce în ce mai încărcată cu dificultăți care proveneau tocmai din lipsa de criterii în alegerea maselor atomice din cele trei tabele existente.

Dar lucrurile au ajuns pînă acolo încît teoria atomistă a lui Dalton a fost pusă sub semnul întrebării. Iar Dumas, cel mai mare chimist al vremii, a mers pînă acolo încît a declarat că dacă ar sta în puterea sa, ar elimina din vocabularul științific cuvîntul „atom".

Dezorientarea a ținut pînă în anul 1858, cînd tînărul chimist italian Stanislao Cannizzaro a reluat teoria atomistă și a arătat cum, pornind de la definiția moleculei dată de Avogadro, se poate ajunge foarte simplu și direct la determinarea masei atomice. A statuat drept masă atomică a unui element cantitatea cea mai mică din acesta care poate intra în alcătuirea unei molecule. Cannizzaro și-a expus ideile mai întîi în diverse publicații, apoi, în 1860, la Congresul Internațional de chimie de la Karlsruhe, din Germania.

Cannizzaro a reușit să impună lumii științifice ideile lui Avogadro. Acum conceptul de moleculă a fost diferențiat de cel de atom, iar succesul ipotezei atomice în interpretarea imensului material acumulat de chimie în decursul unui secol de experiențe a dat acestei ipoteze o bază deosebit de trainică.

Determinarea primelor mase atomice a fost făcută considerînd drept etalon de unitate masa atomică a hidrogenului, iar cea a oxigenului a fost găsită ca fiind 16. Dar determinări mai precise au arătat că această unitate de măsură era cu circa 1% prea mare, astfel că în curînd a fost înlocuită.

Anume, în loc să se considere ca unitate masa atomică a hidrogenului, s-a stabilit ca masa atomică a oxigenului să fie 16, iar unitatea de masă atomică să fie socotită ca a 16-a parte din masa atomică a oxigenului.

Această alegere, care la început pare incomodă, a fost făcută din două motive. În primul rînd, determinarea masei atomice a hidrogenului este o operație delicată și supusă erorilor, datorată tocmai faptului că hidrogenul este cel mai „ușor" element. În al doilea rînd, este mult mai comod să se exprime masa atomică a oxigenului printr-un număr întreg, deoarece oxigenul reacționează cu cea mai mare parte a elementelor, formînd compuși care, la rîndul lor, trebuiau să fie supuși unor analize precise.

Convenția a fost acceptată și menținută de lumea științifică. Admițînd masa atomică a oxigenului ca fiind 16, masa atomică a hidrogenului rezultă ca fiind mai mare decît unitatea, de 1,008, dar la cea mai mare parte a elementelor, valorile maselor atomice au fost găsite ca fiind foarte apropiate de numere întregi. Or, în multe calcule chimice, pentru masele atomice pot fi folosite chiar numerele întregi apropiate, fără a se comite prin aceasta erori prea mari.

Aproximarea prin numere întregi a maselor atomice a elementelor a permis ca la numai 9 ani de la inspirata comunicare a lui Cannizzaro la Congresul de la Karlsruhe să fie elaborată *legea periodicității elementelor*, un instrument științific esențial pentru dezvoltarea ulterioară a chimiei. Cu alte cuvinte, s-ar putea spune că atunci cînd chimiștii au determinat masele atomice ale unui număr suficient de elemente, le-a fost oferită drept recompensă legea periodicității elementelor.

Se poate afirma că și această nouă descoperire reprezintă, de fapt, o sinteză a unor cunoștințe care „pluteau în aer", adică acel salt calitativ care se poate face atunci cînd acumulările cantitative au atins nivelul de „amorsare".

Ne putem ușor imagina cîți dintre chimiștii vremii petreceau ore în șir privind tabelul cu masele atomice ale elementelor, fascinați de jocul numerelor întregi a căror ordine nu o puteau intui. Printre primii care au semnalat o regularitate a „jocului" maselor atomice a fost chimistul Newlands, care, în 1863 și-a publicat observația că „dacă elementele sînt așezate în ordinea maselor atomice, atunci cel de-al optulea element, numărat de la un element dat, este un fel

de repetare a primului, similar octavei la muzică". Observației lui Newlands i s-a spus „legea octavelor".

Oricum, această periodizare nu era întrutotul satisfăcătoare și a fost primită cu multă răceală de chimiști, refuzîndu-i-se publicarea în „Jurnalul" Societății chimice din Londra.

Indiferent de germenii unei legi periodice pe care îl conținea tabelul lui Newlands, un merit de necontestat îi revine chimistului rus D. Mendeleev (1834—1907), pentru stabilirea clară a relațiilor dintre proprietățile elementelor și masele lor atomice, pentru că a impus aceste rezultate chimiștilor contemporani și pentru că a pus bazele unui cuprinzător sistem de clasificare. Mendeleev nota în cartea sa *Principii de chimie:* "...Astfel am început să observ și să scriu elementele cu masele lor atomice și cu proprietățile lor chimice... și astfel m-am convins repede că proprietățile elementelor sînt în dependență periodică cu masele lor atomice..."

Anul 1869 înregistrează în istoria științei nașterea unei legi în care Mendeleev a reușit pentru prima dată să reunească toate elementele într-un sistem unic, care a fost numit „sistemul periodic al elementelor".

Sistemul periodic al elementelor este o organizare tabelară în care elementele chimice sînt așezate în ordinea crescătoare a maselor atomice relative și în care, la intervale regulate, reapar elemente care au o comportare chimică similară (de pildă, litiul, sodiul și potasiul sau clorul, bromul și iodul etc.). Așezarea este astfel făcută încît elementele similare se găsesc pe aceași coloană. În acest fel au fost scoase în evidență asemănările și deosebirile între toate elementelor.

Mendeleev a adus, pe parcurs, modificări și completări ale tabelului, dar în esență a rămas același. Una dintre cele mai strălucite confirmări le-a constituit preconizarea proprietăților elementelor necunoscute la timpul respectiv, indicate de locurile vacante din tabel. Astfel, au fost preconizate trei elemente noi (eka-bor, eka-aluminiu și eka-siliciu), descriindu-se și eventualele proprietăți. După descoperirea ulterioară a celor trei elemente, care au fost numite, respectiv, scandiu, galiu și germaniu, avînd proprietățile preconizate de Mendeleev, a fost eliminat orice dubiu asupra exactității sistemului periodic.

Măsurători în microcosmos

O dată cu clasificarea elementelor chimice în sistemul periodic se încheie perioada de cercetări inițiată de Lavoisier. Sistemul periodic a continuat să se manifeste profund în cercetările ulterioare și va primi cu timpul noi semnificații pe care nici Mendeleev și nici contemporanii săi nu le puteau bănui.

Cercetările de pînă acum au dat chimiștilor posibilitatea de a determina masele atomice ale elementelor, dar evident era vorba de mase relative, adică de a exprima masele atomice ale diverselor elemente în raport cu o unitate definită tot pe baza uneia dintre ele (masa atomică a oxigenului). Adică se puteau determina rapoartele între masele atomice ale diverșilor atomi, dar *nu se putea spune care era masa în grame a atomului.* Se putea spune doar atît că moleculele și atomii sînt atît de mici încît nu pot face obiectul unor observații directe, nici asupra dimensiunilor și nici asupra masei.

O primă probă care a atestat existența reală a moleculelor a constituit-o experiențele fizicianului J. Perrin (1870—1942); în 1908, el a explicat cauzele mișcării browniene, un fenomen enigmatic pînă atunci. Încă din 1827, medicul Robert Brown (1773—1858) a făcut o descoperire care timp de jumătate de secol a rămas neexplicată. Anume, observînd la microscop o picătură de lichid în care se găseau în suspensie minuscule granule de polen, Brown a văzut, cu surprindere, că granulele se mișcă continuu și dezordonat, fiecare din ele parcurgînd drumuri independente în zigzag. Mișcarea nu se oprea niciodată și cu toate că fenomenul era cel puțin straniu, nu a atras atenția oamenilor de știință pentru a-i da o explicație. Și totuși, mișcarea — care a fost numită browniană — continua să fie semnalată în toate fluidele ce conțineau în suspensie particule minuscule și care sînt cu atît mai active cu cît fluidul este mai puțin vîscos sau cu cît particulele sînt mai fine. Apoi s-a constatat că o dată cu creșterea temperaturii fluidului, crește și agitația particulelor.

J. Perrin a emis ipoteza că mișcarea browniană este un intermediar între lumea moleculelor și noi: particulele în suspensie sînt suficient de mari ca să poată fi observate de ochiul uman și totodată suficient de mici pentru a fi men-

ținute în mișcare de ciocnirile moleculelor fluidului în care se află.

Această primă dovadă de existență reală a moleculelor a permis să se determine masele acestora, valori care au fost apoi confirmate prin măsurători efectuate cu alte metode, independente. Faptul că rezultatele măsurătorilor concordau în limitele permise ale erorilor experimentale a fost o dovadă strălucită a valabilității ipotezei atomice.

Măsurătorile au arătat că cel mai „ușor" atom este cel de hidrogen, care are masa de $1{,}673 \cdot 10^{-24}$ g. Aceasta înseamnă că circa 603 miliarde de atomi de hidrogen au masa de... 1 mg! Iar atomul cel mai „greu" care există în natură este cel de uraniu: masa sa este de $398 \cdot 10^{-24}$ g.

Cît despre molecule, pentru a le determina dimensiunile sau — ceea ce este echivalent — numărul de molecule conținut într-un volum dat de gaz, s-au folosit metodele cele mai diverse. Toate au dus însă la același rezultat: volumul de 1 litru din orice gaz, la o anume temperatură și presiune, conține $27 \cdot 10^{21}$ molecule. De aici s-a dedus că dimensiunile moleculelor substanțelor anorganice sînt de ordinul a 10^{-8} cm.

În felul acesta, prin eforturile cîtorva generații de cercetători pasionați, de-abia la începutul secolului al XX-lea teoria atomică a ajuns la o evidență experimentală: moleculele și atomii au fost „măsurați" și cîntăriți.

După primele determinări cantitative se poate spune că a început procesul de descifrare a microcosmosului, înțelegînd prin aceasta lumea obiectelor submicroscopice, a moleculelor și atomilor precum și (cum se va vedea mai departe) a particulelor subatomice etc., în care se petrec fenomene calitativ diferite de cele din lumea din jur cunoscută nemijlocit (a obiectelor macroscopice). Cele ce au urmat în laboratoarele cercetătorilor au avut de acum o bază teoretică și experimentală unanim recunoscută. Foarte curînd, fizicienii au reușit să determine mișcările moleculelor, vitezele acestora, oferind astfel o imagine completă a stării unui gaz, elaborînd teoria cinetică a gazelor.

Pornind de la o experiență a lui Dalton asupra difuziunii gazelor, teoria cinetică a fost completată de Maxwell, Boltzmann (care i-a dat descrierea statistică) și apoi de Einstein.

Capitolul 2

CONTURAREA UNEI LUMI ATOMICE

Electronul pe cîntar

Începutul secolului nostru i-a surprins pe fizicieni într-o situație delicată. Deși teoria atomică fusese recunoscută de lumea științifică, iar atomii și moleculele interveneau fără obiecții în legi verificate de experimente, încă nu a fost demonstrată existența reală a acestor „cărămizi fundamentale" ale substanței. De fapt, situația se complica și prin faptul că se știa, prin interpretarea unor fenomene fizice, că atomul nu este „indivizibil", ci că, la rîndul său, este și el format din particule mai mici, încărcate electric. Primul dintre aceste fenomene a fost electroliza soluțiilor, apoi descărcarea electrică în gaze.

La baza cercetărilor atomiste ale fizicienilor stau legile electrolizei stabilite de Faraday (1791—1867), în anul 1833. Analizînd unele proprietăți ale electroliților, pe baza legilor stabilite de Faraday, chimistul S. Arrhenius ajunge la concluzia că singura explicație a comportării lor în procesul electrolizei este aceea că substanța din care s-au format electroliții se desface în două particule: una încărcată pozitiv (ion pozitiv) și cealaltă negativ (ion negativ). Ionii urmau să se comporte diferit față de atomii neutri, orientîndu-se după polarizarea electrozilor din vasul de electroliză.

Printre oamenii de știință români care au studiat acest fenomen se remarcă Petre Bogdan (1873—1944), care lucrînd cu fizicienii Van't Hoff și W. Ostwald a elaborat un studiu despre mobilitatea ionilor de potasiu, studiu elogiat de S. Arrhenius.

Fizicianul H. Helmholtz (1821—1894) avea să spună: „Legile stabilite de Faraday au demonstrat că dacă se acceptă ipoteza că substanțele elementare sînt alcătuite din atomi, nu se poate să nu se tragă concluzia că și electricitatea este divizată în porțiuni elementare, bine definite, care se comportă ca atomi de electricitate". Iar în 1874, Stoney a numit aceste elemente de sarcină „electroni".

Abia peste cinci ani ideea a fost reluată de W. Crookes, care, făcînd experienţe de descărcări electrice în gaze, a reuşit să descopere razele catodice.

Dacă stabilirea legilor electrolizei de Faraday a fost rezultatul unor experienţe migăloase, în care rolul hotărîtor l-a avut determinarea precisă a maselor, cu ajutorul unor balanţe foarte sensibile, experienţele lui Crookes cu razele catodice aduceau o spectaculozitate aparte. Fenomenele erau imediate şi experienţa putea fi repetată ori de cîte ori se dorea, fără să necesite un timp mai îndelungat, ca în electroliză.

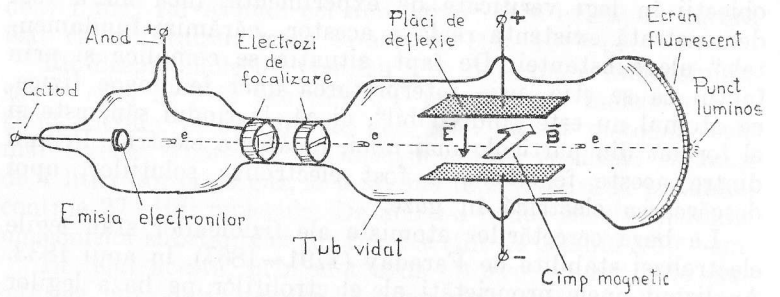


Fig. 3. Tubul catodic.

Tubul de raze catodice este confecţionat din sticlă, închis ermetic, în care se găseşte un gaz foarte rarefiat. În interior sînt doi electrozi metalici, care au contactele în afara tubului şi sînt legaţi la o sursă de curent continuu. Electrodul pozitiv se numeşte anod, iar cel negativ catod. În cazul în care se conectează sursa de curent, în tub apare o descărcare electrică. Efectul este spectaculos: pe peretele tubului opus catodului se observă o mică pată fluorescentă, care dispare dacă se desface legătura cu sursa de curent. S-a tras concluzia că în timpul descărcării în gaz, de la catod porneşte un fascicul de „raze" care, lovind peretele opus, produce fluorescenţă. Deoarece pornesc de la catod, razele au primit numele de raze catodice.

Dar ce sînt aceste raze? Care este natura lor? După ce studiul lor a pasionat diverşi fizicieni, J.J. Thomson (1856—1940) a demonstrat că razele catodice sînt de natură corpusculară. Mai precis, că ele sînt constituite dintr-un flux de particule care au sarcină electrică negativă.

Particulele din componenţa razelor catodice, purtătoare de sarcină electrică negativă, reprezentau aceleaşi sarcini electrice elementare a căror existenţă a fost sugerată de Helmholtz şi pe care Stoney le-a numit „electroni".

Fără îndoială că anul 1897 poate fi considerat anul de naştere al electronului, deoarece J.J. Thomson i-a determinat sarcina specifică, adică raportul dintre sarcina sa, e, şi masa sa, m. Valoarea dată de Thomson este de $0{,}77 \cdot 10^{11}$ C/kg. În prezent, în urma unor măsurători mai precise şi a unor corecţii necunoscute pe timpul lui Thomson, sarcina specifică a electronului a fost determinată ca fiind $e/m = 1{,}759 \cdot 10^{11}$C/kg.

Determinarea sarcinii specifice a electronului a fost făcută prin experienţe delicate, rămase în istoria fizicii. Astfel, se ştie că în tubul descris mai sus, fasciculul de raze catodice se propagă în linie dreaptă. Dar dacă se creează în jurul tubului un cîmp magnetic, razele catodice sînt deviate, urmînd o linie curbă. Prin observarea deviaţiei fasciculului sub acţiunea unor cîmpuri magnetice cunoscute, s-a dedus valoarea sarcinii specifice a electronului, adică raportul e/m.

Sarcina electrică a electronului, e, a fost determinată de Millikan, care în perioada 1908—1913 a adus experienţele sale, bazate pe unele mai vechi, la un mare grad de rafinament şi totuşi de o mare simplitate. Anume, dacă se pulverizează în aer ulei, picăturile fine, microscopice, în procesul lor de formare, se încarcă electric. Observînd la un microscop una dintre aceste particule, se poate constata că sub acţiunea gravitaţiei ea cade pe verticală. Dacă însă particula are o sarcină electrică negativă şi va fi pusă sub acţiunea unui cîmp electric dirijat pe verticală în jos, sub acţiunea cîmpului ea va începe îndată să se mişte în sus cu o viteză care depinde, evident, de intensitatea cîmpului electric.

Comparînd cele două mişcări opuse, de coborîre şi de ridicare a particulelor în cîmpul electric, poate fi calculat raportul forţelor care acţionează şi, de aici, sarcina electrică a picăturii de ulei.

În experienţele sale, pe baza celor de mai sus, s-a constatat că o particulă de ulei nu are o sarcină electrică mai mică decît o anumită valoare, în schimb, poate avea o sarcină dublă sau triplă celei mai mici valori. Or, această „cea mai

mică valoare" reprezintă tocmai sarcina electrică a unui electron. Dacă se ține cont că mișcarea picăturii de ulei în cele două sensuri opuse era observată pe un parcurs mai mic de 1 mm, se poate remarca finețea experimentului.

O dată cunoscută sarcina elementară e, precum și sarcina specifică e/m, determinarea masei electronului a devenit o simplă operație aritmetică. S-a găsit că masa electronului este de circa 1 800 de ori mai mică decît cea a unui atom de hidrogen. Deci un electron are masa de $0{,}88 \cdot 10^{-27}$ g, iar sarcina sa electrică, considerată ca sarcină electrică elementară, e, are valoarea de $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

Un model timid

Anul de naștere al electronului aparține, de fapt, unei serii de patru ani consecutivi, care au inițiat așa-numita „vîrstă de aur" a fizicii. Este vorba de perioada 1895—1898: în 1895 au fost descoperite radiațiile Röntgen (sau razele X), în 1896 a fost descoperit fenomenul radioactivității, în 1897 electronul a devenit o certitudine experimentală, iar în 1898 a fost descoperit radiul. Toate aceste descoperiri nu numai că au constituit o cotitură importantă al domeniului fizicii, dar i-au pus la dispoziție noi și puternice mijloace de cercetare.

De pildă, radiațiile X au ajuns repede atît un instrument mondial de investigare în multe domenii, în special în medicină, cît și experimental, în cele mai multe laboratoare de pe glob.

La numai cîteva luni de la descoperirea radiațiilor X, fizicianul român Dragomir Hurmuzescu (1865—1954) a studiat efectul de ionizare produs de acestea, folosind un electroscop special, construit de el. A inventat un nou izolant numit dielectrină. În anul 1896, în colaborare cu fizicianul francez R. Benoit, descoperă că aerul prin care trec radiațiile X se ionizează.

De asemenea, cu studiul radiațiilor X s-a ocupat Vasile Bianu (1883—1978), care a fost asistent la Institutul Radiului din Paris, între anii 1912—1914. Sub îndrumarea Mariei Curie, Bianu a efectuat o serie de experiențe cu radiațiile X și cu radiațiile emise de poloniu, experiențe concretizate prin comunicări științifice.

Dar o importantă contribuție în domeniul studierii radiațiilor X a avut-o Horia Hulubei (1896—1972), care a obținut cele dintîi spectre de raze X în gaze din lume. Lucrarea sa de doctorat din anul 1933, la Sorbona, a fost onorată cu o prefață semnată de J. Perrin și Marie Curie, ceea ce i-a atestat importanța pentru această ramură a fizicii.

Începutul secolului al XX-lea a dat științei o imagine a electronului, care poate fi rezumată astfel: electronii sînt identici între ei, un electron are cea mai mică sarcină electrică existentă în natură, este cu mult mai „ușor" decît atomul cel mai „ușor" și poate fi obținut din orice substanță, adică din orice atom. Ca urmare, era logic să se concludă că electronul este constituentul universal al tuturor atomilor.

Acceptînd cele două concluzii esențiale: că toți atomii conțin electroni și că electronii au sarcină electrică negativă, precum și faptul că un atom în condiții normale este neutru din punct de vedere electric, fizicienii au fost puși în situația să caute noi explicații. Era clar că în interiorul unui atom trebuie să existe și sarcini electrice pozitive care să neutralizeze sarcina negativă a electronilor.

Dar atomii sînt indivizibili prin metode chimice, adică în toate transformările chimice ei se comportă ca entități compacte și indivizibile. Confirmarea existenței electronilor în componența atomilor a sugerat că totuși atomii au o structură internă, în care neapărat trebuie să se țină seama de jocul sarcinilor pozitive și negative, astfel încît să rezulte starea sa neutră.

Pe de altă parte, dată fiind masa extrem de mică a electronului în raport cu masa atomului, se impunea concluzia că masa atomului este esențial legată de sarcina pozitivă din alcătuirea sa. Această presupunere a fizicienilor a fost, de fapt, susținută de experiența lui Goldstein, din 1886, care a folosit un tub de descărcări în gaze puțin modificat, dovedind existența unei categorii speciale de raze, pe care le-a numit *raze canal*.

Tubul folosit de Goldstein avea catodul perforat în mai multe puncte. Cînd se producea descărcarea, prin legarea celor doi electrozi la o sursă electrică, fiecare parte a catodului emitea cîte un fascicul luminos. În timp ce razele catodice plecau de la catod și loveau peretele opus acestuia, razele canal se formau în gazul dintre catod și anod și loveau catodul. Dar cum acesta era perforat, razele treceau „cana-

lizate" prin perforații spre peretele de sticlă al tubului, în spatele catodului.

Razele canal sînt de asemenea formate din corpuscule, însă un cîmp magnetic exterior le deviază în partea opusă celeia în care erau deviate razele catodice. De aici concluzia că particulele ce formează razele canal sînt încărcate cu sarcină pozitivă.

Experimentatorii au mai constatat încă un aspect interesant. Dacă electronii care formează razele catodice sînt toți egali între ei, particulele care formează razele canal diferă în raport cu gazul care se află în tub. Mai precis, masa oricărei particule este mai mică sau aproape egală cu masa atomului gazului studiat, iar sarcina electrică a uneia dintre aceste particule pozitive are totdeauna o valoare care este un multiplu al sarcinii electrice elementare.

O concluzie simplă arată că acești corpusculi pozitivi, cu puțin mai „ușori" decît atomii, sînt tocmai acele părți ale atomului care au sarcină pozitivă și care în mod necesar trebuie să existe într-un atom pentru a face echilibrul sarcinilor negative ale electronilor.

Cu aceasta se clarifica și imaginea fizică a atomului. Un atom, al oricărui element, trebuia să fie alcătuit dintr-o parte încărcată pozitiv, care are o masă aproape egală cu cea a atomului respectiv (deci diferă de la un element la altul) și dintr-un număr de electroni, toți identici, avînd fiecare o masă aproape neglijabilă și o sarcină electrică negativă, care este cea mai mică sarcină existentă în natură. Sarcina pozitivă este egală cu suma sarcinilor negative ale electronilor.

Cunoscîndu-se în ansamblu alcătuirea unui atom, se punea problema modelului acestuia, adică felul cum constituenții atomului sînt organizați, astfel încît să asigure extraordinara sa stabilitate.

Primul care a îndrăznit să sugereze un model al atomului a fost J.J. Thomson. În 1904, Thomson a sugerat că un atom ar fi alcătuit dintr-o sferă încărcată cu sarcină electrică pozitivă, distribuită uniform, în care ar fi incluși electronii, ca „semințele într-un fruct". Echilibrul sarcinilor electrice s-ar realiza datorită respingerilor și atracțiilor reciproce electrostatice față de centrul sferei pozitive. Curînd însă modelul lui Thomson s-a dovedit inadecvat rezultatelor experimentale și a fost abandonat. Problema a rămas deschisă pînă în anul

1911, cînd, folosindu-se și alte descoperiri, a putut fi stabilit un model care, în linii mari, este folosit uneori și în zilele noastre, într-o primă etapă de studiere a atomului.

O activitate tăcută: radioactivitatea

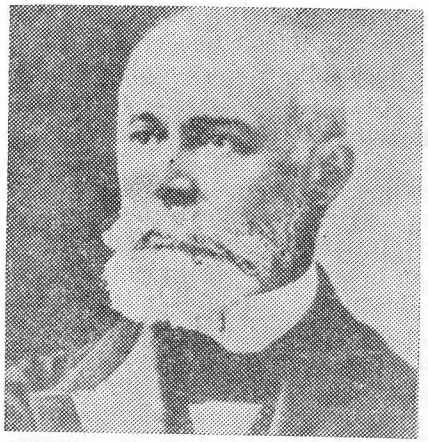
Poate mulți cred că descoperirea radioactivității a fost ceva întîmplător. S-ar putea însă răspunde că nu este chiar așa. Descoperirea a venit într-un moment cînd multe alte descoperiri anterioare au creat o bază suficientă, astfel încît intuiția genială a lui Becquerel, corelată cu o metodă de lucru precisă, au permis cunoașterea fenomenului fizic.

Experiența lui Becquerel a avut loc la trei luni după descoperirea radiațiilor Röntgen, în februarie 1896. Sînt cunoscute experiențele lui cu cristale de sulfat dublu de uraniu și potasiu, în căutarea radiațiilor Röntgen produse de fluorescența cristalului. A avut norocul să aleagă tocmai cristalul care conținea uraniu, din întreaga colecție de cristale pe care i-a lăsat-o tatăl său, de asemenea un pasionat experimentator. Înnegrirea plăcii fotografice de către cristal, în mod spontan, l-a convins pe Becquerel că se află în fața unui fenomen nou. Adică, sarea de uraniu emite spontan radiații penetrante capabile să impresioneze o placă fotografică învelită cu hîrtie neagră și trecînd chiar prin metal.

De îndată ce noul fenomen a fost comunicat lumii științifice, o tînără studentă, Marie Sklodovska Curie și-a pregătit lucrarea de absolvire pe această temă. Împreună cu soțul ei, Pierre Curie, au întreprins experiențe, care pot fi caracterizate dramatice, în studiul pechblendei, un mineral de uraniu. Bănuind că în fenomenul de emisie există un alt element, mai emisiv, cei doi soți, după tratarea unor tone de minereu de uraniu, au reușit să izoleze elementul căutat, pe care l-au numit poloniu. Cîteva luni după aceea au separat radiul, care are puterea emisivă de cîteva milioane de ori mai mare decît uraniul. Fenomenul de emisie spontană de radiații a fost numit *radioactivitate.*

Descoperirea radioactivității a dat un puternic impuls studiului sistematic al mineralelor de uraniu, cercetări care au dus la descoperirea diverselor noi elemente radioactive: actiniul, toriul etc.

Iar despre Marie Curie se poate spune că în afara meritului de a descoperi radiul, cea mai mare descoperire a sa este



Henri Becqerel

principiul care a călăuzit-o în muncă: radioactivitatea este o proprietate a atomului care nu poate fi influențată în nici un fel, de nici un agent cunoscut (temperatură, presiune, iluminare, cîmp electric sau magnetic etc.) și nu se schimbă nici în cazul în care elementul radioactiv este combinat chimic cu alte elemente.

Munca cercetătorilor era acum îndreptată spre determinarea naturii radiațiilor. Studiind radiațiile emise de substanțe radioactive, Rutherford a ajuns la concluzia că ele sînt formate din trei tipuri distincte. A ajuns la acest rezultat observînd absorbția diferențiată a radiațiilor de diverse corpuri, constatînd că nu toate radiațiile sînt la fel absorbite. Pe această bază, el a introdus noțiunea de putere penetrantă, care reprezintă grosimea unui anumit corp pe care îl poate străbate o radiație.

Determinările experimentale ale lui Rutherford au arătat că radiațiile radioactive nu pot străbate toate aceleași grosimi de substanță. Astfel, un grup de radiații este absorbit total de o placă de aluminiu groasă de 0,01 mm; în schimb, alte radiații pot străbate plăci mai groase, fiind absorbite de o placă de aluminiu groasă de 1 mm. În sfîrșit, o a treia categorie de radiații este absorbită abia la o grosime de circa 10 cm a plăcilor de aluminiu.

Cele trei grupuri de radiații au fost numite, respectiv, alfa, beta și gama. În linii mari, se poate spune că radiațiile

beta sînt de circa 100 de ori mai penetrante decît radiațiile alfa, iar radiațiile gama sînt de 10—100 de ori mai penetrante decît radiațiile beta.

În afară de puterea lor de penetrare diferită, radiațiile alfa și beta se diferențiază și prin comportamentul lor diferit în cîmpul electric. Experiența celebră de separare a celor trei radiații folosește un bloc de plumb, de formă cubică, prevăzut cu o adîncitură pe una din fețe. În adîncitură se pune puțină substanță radioactivă. Blocul de plumb absoarbe toate radiațiile emise de substanța radioactivă, astfel că prin canalul adînciturii se obține doar un fascicul îngust de radiații, pe o direcție bine definită. Așezînd blocul de plumb între două plăci metalice, dispuse lateral și încărcate electric, pe o placă fotografică așezată perpendicular pe direcția fasciculului de radiații se constată următoarele: o parte a fasciculului este deviată de placa metalică încărcată negativ (deci fasciculul are sarcină pozitivă), o altă parte este atrasă de placa metalică încărcată pozitiv (deci fasciculul are sarcină negativă), iar a treia parte a fasciculului rămîne nedeviată. Cele trei radiații au fost identificate ca fiind, respectiv, alfa, beta și gama.

A urmat studiul celor trei radiații și în cîmpul magnetic. Cu radiațiile beta și gama lucrurile au mers mai simplu. Încă din 1899, Becquerel și alții au arătat că radiațiile beta reprezintă un flux de electroni, proiectați de substanța radioactivă, cu o viteză apropiată de viteza luminii.

Faptul că radiațiile gama nu sînt deviate nici de cîmpul electric și nici de cel magnetic a dus la concluzia fie că sînt alcătuite din particule neutre din punct de vedere electric, fie că este vorba de o radiație electromagnetică, analoagă luminii sau radiațiilor X. În 1900, P. Villard a ajuns la concluzia că radiația gama este constituită din radiații electromagnetice.

Se știe că radiațiile electromagnetice se propagă sub formă de unde, cu viteza luminii. Ele sînt caracterizate prin lungimea de undă (λ) ori prin frecvență (ν), legate prin relația $\lambda = c/\nu$.

Radiațiile gama au lungimea de undă mai mică decît radiațiile X, deci o frecvență mai mare. Din acest motiv,

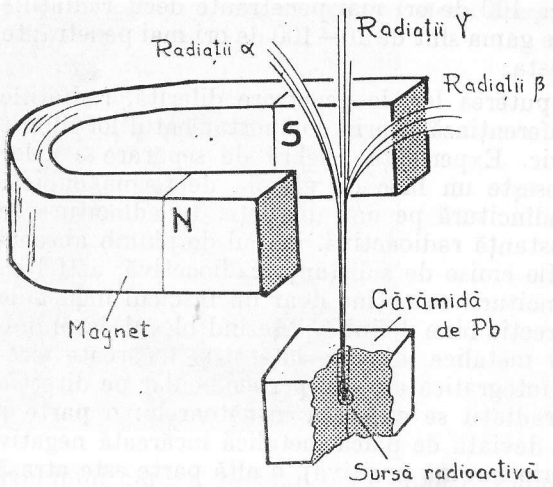


Fig. 4. Separarea alfa, beta, gama în cîmp magnetic.

radiațiile gama sînt mai penetrante decît radiațiile X: ele reușesc să parcurgă un strat de cîțiva centimetri de plumb. De pildă, radiațiile gama emise de radiu pot să mai fie detectate și după ce au străbătut 30 cm de plumb.

Mult mai laborioase au fost cercetările pentru stabilirea naturii radiațiilor alfa. În primele stadii ale cercetărilor au fost determinate cîteva proprietăți, în afara puterii de penetrație (care a fost măsurată de Rutherford). Astfel, s-a constatat că au o natură corpusculară, avînd masa mult mai mare decît cea a particulelor beta și avînd o sarcină electrică pozitivă. Viteza lor este de 12 000—20 000 km/s.

Rutherford și colaboratorii săi și-au făcut din studiul particulelor alfa principalul domeniu de cercetări, imaginînd o experiență prin care separau particulele alfa de particulele beta, colectîndu-le într-un mic tub. După un timp au supus tubul unui examen spectroscopic și au constatat că acesta conține heliu. Interpretînd experiența după drumul și ciocnirea particulelor alfa cu pereții tubului de sticlă, Rutherford a ajuns la concluzia că particulele alfa reprezintă atomi de heliu din care lipsesc electronii.

Un bombardament pașnic

Cunoscînd natura particulelor alfa, Rutherford a avut geniala idee să le întrebuințeze ca o nouă armă pentru studierea constituției atomului. Mai precis, îl interesa cum sînt dispuse în atom sarcinile pozitive și cele negative. Întrucît particulele alfa sînt emise cu mare viteză de substanța radioactivă, ele ar putea fi trecute prin alte substanțe, iar dimensiunile lor le vor putea permite să traverseze substanța „la nivelul atomilor". În cazul cînd particula alfa întîlnește în drumul ei particule care fac parte din structura atomului, va interacționa după legile cunoscute ale electrostaticii: va fi atrasă de sarcinile negative și va fi respinsă de sarcinile pozitive. După felul cum particulele alfa vor străbate substanța, precum și gradul lor de deviație, care poate fi înregistrat pe o placă fotografică, se vor putea afla informații despre felul cum sînt dispuse sarcinile electrice în atom.

Aceasta a fost ideea genială a lui Rutherford, care s-a concretizat apoi prin numeroase experiențe. Rezultatul experiențelor a fost straniu și neașteptat. Plăcile fotografice au arătat că cea mai mare parte a particulelor alfa nu au fost deviate din drumul lor, străbătînd nestingherite o placă metalică subțire; doar cîteva particule alfa au fost puternic deviate din drumul lor, iar unele au fost chiar respinse înapoi. De pildă, experiența făcută cu o placă subțire de platină

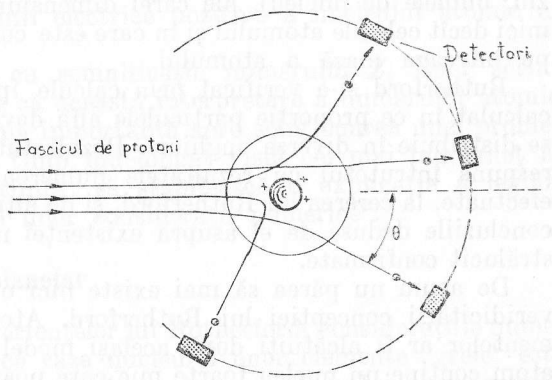


Fig. 5. Experimentul lui Rutherford cu împrăștierea alfa.

a arătat că doar o singură particulă alfa din opt mii era deviată cu un unghi mai mare decît 90°. Cum se putea interpreta acest rezultat?

Faptul că majoritatea particulelor alfa traversau practic nestingherite placa metalică a arătat că în cea mai mare parte atomul este un spațiu gol, contrar ideii antice, care concepea atomul ca o particulă compactă de substanță. Pe de altă parte, deviațiile puternice suferite de unele particule alfa nu puteau fi rezultatul ciocnirii sale cu vreunul dintre electronii conținuți de atomi, din cauza masei mult mai mici a electronului. Rămînea ipoteza că fiecare dintre aceste mari deviații trebuiau să fie rezultatul acțiunii asupra particulei alfa a acelei părți a atomului care conține aproape toată masa atomului și întreaga sa sarcină pozitivă. Întrucît sarcina particulei alfa este de asemenea pozitivă, ciocnirea nu era de natură mecanică, ci una electrică, în sensul că sarcina pozitivă a atomului a respins particula alfa care a ajuns lîngă ea, cu o forță electrică cu atît mai mare, cu cît era mai mare apropierea dintre cele două sarcini. Deci în interiorul atomului există un intens cîmp electric, prin care se explică deviațiile particulelor alfa.

Bazîndu-se pe rezultatele experiențelor sale, în anul 1911 Rutherford a propus un model al atomului în care se preconizează că există un intens cîmp electric. Mai precis, el consideră că sarcina pozitivă a unui atom este concentrată în centru, într-o zonă relativ mică (căreia i-a fost dat, mai tîrziu, numele de nucleu), ale cărei dimensiuni sînt mult mai mici decît cele ale atomului și în care este concentrată aproape întreaga masă a atomului.

Rutherford și-a verificat prin calcule ipoteza, anume a calculat în ce proporție particulele alfa deviate ar trebui să se distribuie în diverse unghiuri. Rezultatul calculului a corespuns întrutotul cu rezultatele numeroaselor experiențe efectuate, la cererea lui Rutherford, și de alți fizicieni. Astfel, concluziile deduse de el asupra existenței nucleului au fost strălucit confirmate.

De acum nu părea să mai existe nici o îndoială asupra veridicității concepției lui Rutherford. Atomii tuturor elementelor ar fi alcătuiți după același model general; fiecare atom conține un nucleu foarte mic care poartă întreaga sarcină pozitivă și aproape toată masa atomului. Deoarece, în ansamblul său, atomul este neutru din punct de vedere electric, el trebuie să conțină, în afara nucleului, un asemenea număr de electroni încît suma sarcinilor lor negative să fie egală cu întreaga sarcină pozitivă a nucleului. Acești electroni se găsesc în jurul nucleului, sau cum s-ar mai putea spune, îl „protejează" de ceea ce ar veni din exteriorul nucleului, cu excepția unor particule de foarte mare energie.

Pentru a putea exprima valoarea sarcinii pozitive a nucleului, în fizica atomică s-a admis ca sarcina elementară negativă, sarcina electronului notată cu e, să fie considerată ca unitatea de sarcină electrică, adică egală cu -1.

În cazul acesta, cum se exprimă sarcina electrică a nucleului? S-a sugerat, în anul 1913, ca sarcina electrică a nucleului atomului unui element oarecare să aibă o valoare egală cu cea care se numește numărul atomic Z al elementului, adică numărul său de ordine din tabelul sistemului periodic al elementelor. După cum se știe, în acest tabel elementele sînt aranjate în ordinea crescătoare a maselor lor atomice.

Deci, potrivit sugestiei făcute, nucleul atomului de hidrogen are o sarcină pozitivă egală cu 1, nucleul de heliu are sarcina 2, ..., nucleul de aur are sarcina 79, ..., nucleul de uraniu are sarcina 92 (adică, respectiv, de 1, 2, 79, 92 de ori valoarea sarcinii absolute a electronului).

Ideea a fost confirmată de experiențele cu radiații X ale lui Moseley, fiind astfel recunoscută importanța ei. Numărul atomic al unui element, care pînă acum a fost doar numărul ce indica poziția elementului în tabelul sistemului periodic, a primit o semnificație fizică reală; el reprezintă în unități e valoarea sarcinii electrice pozitive a nucleului atomic al elementului.

În legătură cu semnificația numărului Z, Bohr scria: „Se poate spune că această interpretare a numărului atomic constituie o etapă importantă spre soluționarea unei probleme care a fost timp îndelungat visul cel mai îndrăzneț al oamenilor de știință: să stabilească o explicație a legilor naturii pe baza unor considerații numerice".

Un model planetar

În urma experiențelor lui Rutherford, considerațiile numerice au arătat că raza nucleului unor elemente „grele" este de ordinul 10^{-14} m, în timp ce raza atomului este de ordinul 10^{-10} m. Pentru a avea o idee asupra acestor dimensiuni

relative ale atomului și nucleului său, acestea pot fi asemănate astfel: dacă atomul ar fi considerat ca o sferă cu diametrul de 1 km, atunci nucleul său ar fi în centrul aceste sfere, ca o minge cu diametrul de cîțiva centimetri.

Existau acum suficiente elemente pentru a se putea încerca reprezentarea unui model al atomului. În 1911, Rutherford a propus un model, care apoi a stat la baza dezvoltării fizicii atomice pînă în anul 1925. Chiar și astăzi este considerat ca o bună aproximare a descrierii atomului, nu numai din punct de vedere istoric și didactic, ci pentru că pune la dispoziție baza unui limbaj care s-a dovedit a fi totodată comod și expresiv.

Potrivit acestui celebru model, atomul se comportă ca un sistem solar în miniatură: în centru se găsește nucleul — soarele acestui sistem — în care este concentrată întreaga masă și întreaga sarcină electrică pozitivă a atomului. În jurul nucleului se rotesc, pe orbite, electronii, la fel cum planetele se rotesc în jurul Soarelui. De fapt, electronii, care au o sarcină electrică negativă, sînt atrași de nucleul pozitiv cu o forță electrică invers porporțională cu pătratul distanței, ca și forța gravitațională care leagă planetele de Soare.

Asemănător unui sistem planetar, atomul este în cea mai mare parte spațiu gol; și întocmai cum în Soare este concentrată aproape întreaga masă a sistemului planetar,

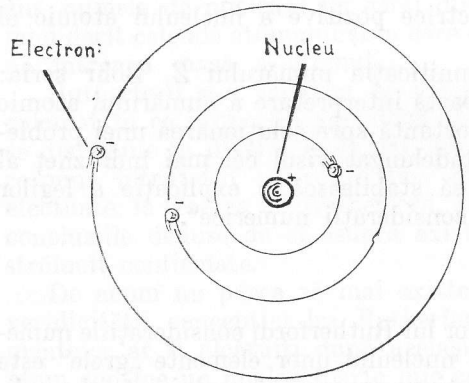


Fig. 6. Modelul atomului planetar.

tot așa în nucleul atomic este concentrată aproape întreaga masă a atomului. Evident, aceste asemănări sînt doar reprezentări orientative, fără pretenții.

După cum se considera pe atunci, cu modelul atomic planetar fizica atomică a atins un nivel grandios și problema structurii atomului părea practic rezolvată. Ce era mai simplu decît să se descrie, de pildă, oricare dintre atomii celor 92 de elemente ca fiind format dintr-un nucleu central, cu Z sarcini pozitive și care are în jurul său Z electroni. De exemplu, heliul are atomul format dintr-un nucleu central, cu sarcina electrică $+2$ și în jurul lui se rotesc 2 electroni. Dar iată și o enigmă: masa atomului de heliu este 4, adică de 4 ori mai mare decît masa atomului de hidrogen, care ar reprezenta o bună aproximație a unității de masă atomică.

Nu se știe dacă diferența dintre numărul atomic și masa atomului l-au neliniștit pe Rutherford, dar se știe că el nu-și făcea iluzii că în privința structurii atomului s-a spus totul. El bănuia că mai trebuie să existe și alte particule și ca modelul său este doar un model general.

Mai precis, nu se poate spune că modelul lui Rutherford reprezintă realitatea, ci doar că explică bine o realitate. Atît reprezentarea atomului propusă de el, cît și cele ce-i vor urma sînt doar modele utile pentru a înțelege comportarea atomilor.

Un lucru esențial se poate însă reține din concepția lui Rutherford: caracteristica fundamentală a unui atom o dă valoarea sarcinii electrice a nucleului, deci numărul său atomic Z; totodată aceasta este și valoarea care determină numărul electronilor planetari și, în consecință, proprietățile chimice ale atomului respectiv. De aici derivă rațiunea marii stabilități a elementelor neradioactive, iar reacțiile chimice modifică doar legăturile electronilor planetari ai atomului, fără a ajunge la nucleu.

În schimb, proprietățile radioactive ale unui atom radioactiv, după cum se va vedea mai departe, nu sînt influențate de legăturile chimice, de radiațiile X și de oricare alți agenți fizici, cu excepția ciocnirii cu particule sau radiații foarte penetrante. Aceasta demonstrează că proprietățile

radioactive ale unui atom își au sediul în nucleul său, iar electronii planetari nu au nici o influență în acest caz.

Avîndu-se în vedere aceste două considerații, se pot distinge două ramuri deosebite ale fizicii: fizica atomică și fizica nucleară. Prima are ca obiect de studiu comportarea electronilor planetari sau sateliți ai atomului, iar nucleul intervine doar ca o particulă unitară și de dimensiuni neglijabile, caracterizat doar prin masă și sarcină pozitivă.

Fizica nucleară are drept obiect de studiu nucleul atomic, particulele care îl compun și forțele care acționează între aceste particule.

Capitolul 3

ATOMUL ȘI-A ASIGURAT FIZICA PROPRIE

Un mic impas

Un atom în stare normală este deci neutru, adică sarcina electrică pozitivă a nucleului este echilibrată de sarcinile electrice negative ale electronilor orbitali. Dar în anumite situații, atomul poate pierde cîțiva electroni din „cortegiul" său. Întrucît electronii reprezintă sarcini negative, atomul, după pierderea electronilor nu mai rămîne neutru, ci ca urmare a modificării echilibrului electric devine pozitiv. Un astfel de atom se numește *ion pozitiv*. Mai precis, dacă atomul a pierdut un electron se numește ion pozitiv monovalent, în cazul că a pierdut doi electroni — ion pozitiv bivalent etc.

Pentru ca un electron să poată părăsi un atom este necesar ca el să posede energia necesară pentru a învinge forțele care îl țin legat de nucleu. Această energie îi poate fi furnizată din exterior pe mai multe căi: radiații X, radiații ultraviolete, radiații luminoase vizibile etc., sau să fie ciocnit de o particulă cu viteză mare; de asemenea, ciocnirile mai pot fi produse printr-o ridicare potrivită a temperaturii sau de o descărcare electrică.

Dacă energia transmisă din exterior unui atom este suficient de mare, atunci numărul electronilor orbitali care pot părăsi atomul poate fi mai mare: doi, trei, patru ... sau chiar toți electronii. În acest ultim caz se spune că atomul este complet ionizat.

În jurul nostru nu există obișnuit condiții pentru a avea atomi complet ionizați (cu excepția descărcărilor electrice), dar această stare a atomilor este comună în stele, unde există temperaturi de ordinul milioanelor de grade și în care există din abundență radiații X și particule de mare viteză. În stele, aproape toți atomii sînt complet ionizați, fiind reduși, de fapt, doar la nuclee.

Dar este posibil ca un atom să captureze cîțiva electroni în plus și ca rezultat să posede în ansamblu o sarcină electrică

negativă. În acest caz atomul a devenit un ion negativ: monovalent, bivalent, trivalent etc., după numărul electronilor capturați.

Fenomenul de ionizare a atomilor permite acum să se dea o explicație originii razelor catodice și razelor canal. Astfel, atunci cînd prin gazul din tub se produce o descărcare electrică, unii dintre atomii catodului precum și o parte mare dintre atomii gazului pierd electroni orbitali. Adică, în interiorul tubului se află trei tipuri de particule: atomi ai gazului, electroni liberi și ioni pozitivi. Electronii, care au o sarcină electrică negativă, vor fi respinși cu putere de catod (care de asemenea este încărcat negativ) și vor lovi cu putere pe peretele tubului opus catodului. Acest flux de electroni constituie razele catodice. De fapt, cîteva experiențe au dovedit clar că razele catodice sînt constituite din electroni.

În același timp, ionii pozitivi vor fi puternic atrași de catod. Cum în experiența lui Goldstein catodul a fost perforat, ionii vor trece prin orificii și vor lovi puternic peretele tubului din spatele catodului. Acest flux de ioni pozitivi constituie razele canal. De fapt, și măsurătorile experimentale au arătat că razele canal sînt constituite din particule încărcate pozitiv, a căror masă diferă în funcție de gazul conținut în tub.

Problema ionizării gazelor și a descărcării în gaze a preocupat și pe oamenii de știință români. Astfel, în anii '30, fizicienii Eugen Bădărău (1887—1975) și Teodor I. Câmpan (1899—1930) s-au dedicat studierii ionilor pozitivi. E Bădărău a fost printre primii cercetători din lume care a dovedit, pe baze experimentale, că dacă metalele sînt supuse unui bombardament de ioni pozitivi, emit electroni.

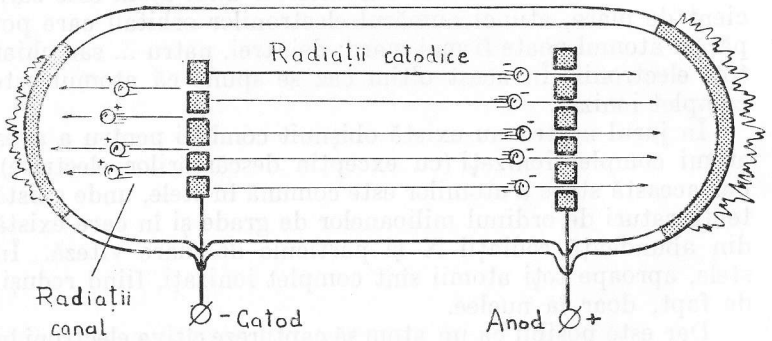


Fig. 7. Razele canal.

Iar lucrarea de doctorat a cercetătorului Teodor I. Câmpan, un iscusit fizician experimentator, privind ionizarea gazelor prin ioni pozitivi și emisia secundară a platinei („Phys. Ztschr"., 1930), a fost considerată de specialiștii din Occident ca cea mai bună lucrare din domeniul respectiv. Folosind o metodă directă și o instalație experimentală originală, el a stabilit o relație importantă între previziunile teoretice și experiment, stîrnind un mare interes la timpul său. Numele lui Teodor I. Câmpan a fost citat în *Fizica* lui A.H. Compton, din 1940, precum și în publicațiile de specialitate.

Dar pe măsură ce se clarificau unele stări ale atomului, modelul elaborat de Rutherford începea să întîlnească o serie de dificultăți. Asemănarea cu un sistem planetar era deosebit de atrăgătoare, dar supusă unor confruntări cu legile cunoscute și verificate ale fizicii, imaginea începea să se îndepărteze de realitate. De pildă, rotirea electronilor pe orbite în jurul nucleului trebuia să se supună legilor fundamentale ale teoriei electromagnetice: dacă un corp încărcat electric are o altfel de mișcare decît rectilinie și uniformă, el radiază energie. Deci, electronul rotindu-se în jurul nucleului ar trebui să piardă continuu energie prin radiație și, în consecință, ar trebui să se apropie treptat de nucleu, parcurgînd nu o orbită fixă, ci o spirală și, în final, va cădea pe nucleu. Atunci atomul ar înceta să mai existe ca atare, după numai o sutime de milionime de secundă!

Se vede deci cum aplicînd legile electrodinamicii clasice se ajunge la concluzia absurdă că atomii nu sînt sisteme stabile, fapt contrazis de realitate.

Dar, pe lîngă dificultatea teoretică amintită, modelul planetar a dus la o contradicție cu fapte experimentale. Este vorba de spectrul gazelor, studiu care se face cu spectroscopul de dispersie, un aparat inventat în 1859.

Se știe că piesa principală a unui spectroscop de dispersie este prisma de sticlă, prin care se obține refracția și dispersia luminii care cade pe o față a ei.

Dacă se admite modelul planetar, atunci mișcarea electronilor pe orbite are ca efect emiterea de radiații electro-

magnetice a căror frecvență fundamentală coincide cu frecvența mișcării electronului pe orbită. Dar dacă electronul, potrivit legilor amintite, s-ar roti în formă de spirală, el ar emite radiații electromagnetice a căror frecvență variază lin, putînd lua orice valori. Or, cum un corp oarecare este alcătuit dintr-un număr enorm de atomi, care se găsesc în toate momentele posibile ale existenței lor, descriind spirale ei ar trebui să emită toate frecvențele posibile. Dar această concluzie este în flagrant conflict cu experiența. Iată cum:

Studiind spectrul luminii emise de un anume corp, înseamnă a-i separa radiațiile de diverse frecvențe. Orice sursă de lumină are un spectru care îi este specific. De pildă, dacă se studiază spectrul unui gaz monoatomic (neon, argon) incandescent, se vede că el este constituit dintr-un număr mai mult sau mai puțin mare de linii luminoase de diferite culori, pe un fond obscur. Cum spectrul este specific fiecărui corp, ori de cîte ori se va repeta experiența cu gazul respectiv se vor obține aceleași linii, așezate în aceleași locuri (adică liniile corespund acelorași frecvențe). Mai mult, liniile unui anume corp pot fi identificate, pe aceleași locuri, chiar cînd corpul considerat este amestecat cu un alt corp, constituind ceea ce ar putea fi numit „semnătura" corpului.

Și astfel experiența a arătat că atomii unui gaz nu emit radiații ale tuturor frecvențelor posibile, cum ar cere legile clasice aplicate modelului planetar, ci, dimpotrivă, emit doar cîteva radiații de frecvențe riguros constante.

Iată cum s-a ajuns la contradicția modelului atomic al lui Rutherford cu experiența, atunci cînd se aplică legile clasice ale mecanicii și electromagnetismului. Referindu-se la acest impas, H. Poincaré avea să constate ..că aici este unul dintre cele mai importante secrete ale naturii".

Cum puteau fi depășite aceste dificultăți? Era care necesar să fie abandonat modelul atomic planetar, care, totuși, era atît de bine legat de sistemul periodic al elementelor? De fapt, nu era prima dată cînd fizicienii întîlneau contradicții și dificultăți în încercările lor de a aplica atomilor legile fizicii clasice; curînd ei aveau să se convingă că aceste legi nu sînt valabile cînd se trece la lumea microcosmosului.

O piatră de hotar: teoria cuantelor

În urmă cu cîtva timp se făcuseră, cu succes, unele încercări pentru a substitui legilor clasice ale fizicii legi noi, care să poată interpreta rezultatele experimentale. Acestea nu erau însă extensii ale legilor cunoscute, ci, dimpotrivă, legi care reprezentau o modificare empirică a legilor clasice, elaborate în scopul de a pune de acord rezultatele experiențelor cu deducțiile teoretice.

O primă tentativă reușită a fost făcută încă din 1900, de fizicianul Max Planck, tentativă cate a fost apoi extinsă de Albert Einstein, în 1905. Iată care sînt, pe scurt, noile concepte care au dus la noile legi ce guvernează lumea microcosmosului.

Pentru studiu a fost definit un corp care are proprietatea de a absorbi toate radiațiile care cad pe el, numit corp negru. Corpul negru poate, de asemenea, să emită radiații, dar aplicîndu-i legile fizicii clasice s-a ajuns la un rezultat în contradicție totală cu experiența. Max Planck, la sfîrșitul anului 1899, a intervenit surprinzător, arătînd că rezultatele pot fi puse de acord dacă se admite ipoteza că atunci cînd un atom emite energie sub formă de radiații de frecvență ν, aceasta nu este emisă în spectru continuu, ci doar în cantități fixe, care sînt multipli ai unei cantități elementare, ε. Acestei cantități elementare, Planck i-a dat numele de *cuantă de energie*.

Știindu-se că orice undă electromagnetică este caracterizată prin frecvență, se pune întrebarea: ce frecvență au undele electromagnetice care constituie o cuantă a unei anumite energii? Planck a găsit un răspuns la această întrebare, stabilind, în 1900, relația dintre energia unei cuante și frecvența radiației respective. Anume, cu cît este mai mare frecvența ν a radiației emise, cu atît va fi mai mare energia ε care caracterizează cuanta.

Relația se scrie foarte simplu: $\varepsilon = h\nu$, unde h este o constantă extrem de mică ($h = 6{,}625 \cdot 10^{-34}$ J · s), fiind numită constanta lui Planck (iar mai tîrziu, constanta de acțiune). S-a arătat apoi că h este o constantă universală, iar importanța ei a devenit cu timpul tot mai evidentă.

Descoperirea lui Planck a stîrnit însă multă vîlvă. Chiar Planck a ezitat mult înainte de a o face cunoscută, deoarece ipoteza emisă de el era revoluționară, modificînd principiul

de bază al fizicii clasice, conform căruia toate acțiunile se desfășoară prin variații continue. Dar ipoteza lui Planck era singura care putea explica datele experimentale.

După un sfert de secol de la elaborarea teoriei cuantelor, fizicianul Niels Bohr scria: „Fără îndoială, în istoria științelor există puține evenimente care în perioada scurtă a unei generații să fi avut consecințe atît de importante ca descoperirea lui Planck".

Și astfel s-a născut ideea că legile fizicii clasice nu pot fi aplicate microcosmosului. Teoria cuantelor i-a permis fizicianului Albert Einstein să depășească contradicția dintre teoria ondulatorie a luminii și rezultatele experimentale ale efectului fotoelectric, arătînd că și lumina are o structură corpusculară, adică se propagă prin cuante de energie, pe care le-a numit *fotoni*. Dacă ipoteza lui Planck se referă la modul în care energia este emisă și absorbită de atomi, ipoteza lui Einstein, deși se bazează pe ipoteza lui Planck, reprezintă o ipoteză diferită, referindu-se la modul în care se propagă radiațiile în spațiu.

Ipoteza cuantelor era în plină afirmare, explicînd strălucit numeroase rezultate experimentale, iar valoarea constantei h coincidea remarcabil în studiul celor mai diverse fenomene.

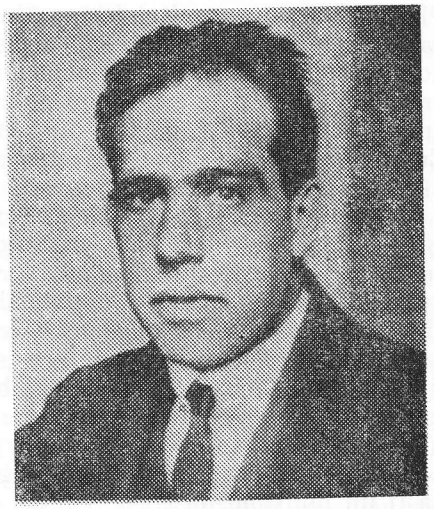
Dar, nici noua teorie nu a fost scutită de dificultăți. Existau încă fenomene care nu puteau fi explicate dacă se contesta luminii natura ondulatorie. Este vorba de fenomenele de difracție și de interferență, care puteau fi explicate foarte ușor considerînd lumina ca avînd natură ondulatorie. Dilema ondulatoriu-corpuscular a fost lămurită de fizicianul L. de Broglie, în 1924.

Succesele teoriei cuantelor nu trebuie înțelese în sensul că teoriile clasice sînt false; noua teorie dovedește doar că teoriile clasice — care au fost deduse prin observarea mișcărilor corpurilor macroscopice și explică foarte bine fenomenele respective — nu pot explica structura microcosmosului.

Un model care place

Fizicienii au observat că aplicînd legile fizicii clasice modelului atomic planetar nu se puteau explica nici stabilitatea atomului și nici existența liniilor din spectrele gazelor.

Niels Bohr



Apărea tot mai evident că în interiorul atomului acționau alte legi, încă necunoscute.

Pe o astfel de direcție și-a îndreptat cercetările fizicianul Niels Bohr. Observînd că nici una din încercările făcute pînă atunci nu puteau explica stabilitatea atomului, și-a dat seama că ar trebui introdus un principiu nou, diferit de fizica existentă. Chiar dacă era convins că trebuie introdus ceva nou, Bohr nu s-a gîndit la un principiu cu totul diferit de fizica existentă, ci s-a folosit de recenta teorie a lui Planck și Einstein, care stabilea natura cuantică a luminii.

Bohr a prezentat teoria cuantică a atomului, stabilită de el, la una din sesiunile Consiliului Solvay, folosind ca model particular atomul de hidrogen, care este cel mai simplu atom existent în natură. Noua teorie acceptă modelul atomic planetar, după care un atom de hidrogen este constituit dintr-un nucleu central în jurul căruia orbitează un singur electron, adăugînd însă cîteva ipoteze noi. Anume, Bohr a folosit magistral elementele de teorie cuantică cunoscute pînă atunci. Astfel, se știe că ori de cîte ori un sistem emite sau absoarbe radiații de frecvență ν (de pildă lumină), energia emisă sau absorbită este proporțională cu frecvența, adică este egală cu produsul $h\nu$, în care h este constanta lui

Planck. Dar cum rezultatele experimentale arătau clar că un gaz nu emite radiații de toate frecvențele posibile, ci emite doar unele radiații, de frecvențe bine determinate, se poate presupune o concluzie surprinzătoare: că energia unui atom nu poate avea orice valoare, ci numai cîteva valori discrete. Cu alte cuvinte s-ar spune că atomul poate avea doar cîteva *nivele energetice* sau *stări cuantice*.

Ideea mai poate fi extinsă astfel: atîta timp cît atomul se află în una din aceste stări cuantice nu emite energie; dar emite o cuantă de energie ε sub forma unei radiații electromagnetice de frecvența ν (legată de ε prin relația $\varepsilon = h\nu$) atunci cînd trece de la un nivel energetic superior la unul inferior, astfel încît diferența în aceste două stări este un multiplu de h. Fenomenul este reversibil: atunci cînd un atom este „lovit" de o radiație de frecvență ν, absoarbe o cuantă $\varepsilon(=h\nu)$ și trece de la un nivel energetic inferior la unul superior, astfel încît diferența de energie dintre cele două nivele va fi un multiplu de ε.

Folosind concluziile de mai sus, Bohr a postulat patru ipoteze, pe care le-a aplicat atomului de hidrogen:

1. Electronii nu se pot roti în jurul nucleului atomic pe orbite circulare de orice rază, ci numai pe anumite orbite privilegiate, și oricărei astfel de orbite i se asociază o anumită energie.

1. Atîta timp cît se rotește pe una din aceste orbite, electronul nu emite energie.

3. Electronul poate trece spontan de pe o orbită privilegiată pe altă orbită privilegiată de energie mai mică, emițînd o radiație a cărei energie este egală cu diferența de energie dintre cele două orbite.

4. Atunci cînd electronul face un salt între două orbite ale căror energii diferă cu valoarea ε, frecvența radiației emise ν este legată de ε prin relația $\varepsilon = h\nu$.

Prin cele patru postulate, teoria atomică elaborată de Bohr a pus la îndemîna fizicienilor un model care putea explica atît stabilitatea atomului, cît și existența spectrelor de linii emise de gaze în stare atomică. Într-adevăr, în cazul atomului de hidrogen, deoarece electronul se poate găsi doar pe un număr de anumite orbite, atomul poate emite un număr determinat de energii de diferite valori (adică doar cîteva radiații de frecvențe bine determinate), corespunzînd saltului dintre două orbite permise, prima avînd un nivel energetic mai mare decît cea pe care electronul ajunge în final.

Modelul postulat de Bohr poate explica și spectrul de linii emis de hidrogen în stare excitată. Se știe că în spectrul hidrogenului se vede un număr mare de linii (dintre care numai patru în vizibil). Prin saltul unui electron de pe un nivel energetic superior pe unul inferior se emite o radiație de o anume frecvență, care poate fi regăsită în spectrul gazului. Dar cum gazul considerat este format dintr-un număr enorm de atomi, iar în fiecare dintre aceștia există electroni ce pot face salturi de pe oricare din orbitele permise, în spectrul gazului pot apărea simultan toate radiațiile de frecvențe corespunzătoare tuturor diferențelor de nivel energetic posibile. Întregul fenomen s-ar putea caracteriza ca „un efect cumulator al unei orchestre de electroni".

Dintre toate orbitele unui atom permise electronilor, cea cu nivelul energetic cel mai scăzut este și cea mai apropiată de nucleu. De aceea, electronul de pe această orbită este puternic legat de nucleu. În condiții normale, într-un atom de hidrogen electronul se află pe orbita cu nivelul energetic cel mai scăzut. În acest caz se spune că atomul este în starea fundamentală sau pe nivelul fundamental, deoarece aceasta este starea lui cea mai stabilă.

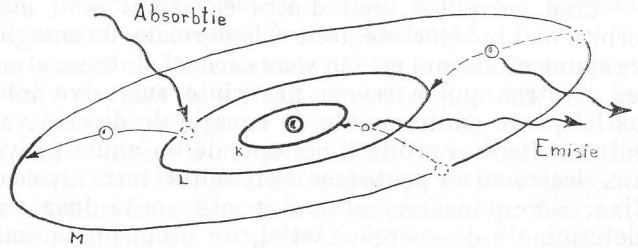


Fig. 8. Salturile electronilor.

Atomul de hidrogen aflat în starea fundamentală nu emite energie. Pentru a emite energie, electronul său nu trebuie să se afle pe orbita cea mai mică, adică este necesar ca printr-o metodă oarecare (iluminare, încălzire etc.) să se furnizeze atomului energie din exterior, astfel încît să treacă din starea

fundamentală într-o stare energetică mai mare, adică electronul să treacă pe o orbită mai îndepărtată de nucleu.

De pildă, dacă electronul „sare" pe orbita a doua (în ordine dinspre nucleu), el nu are o poziție stabilă: după un scurt timp se reîntoarce pe orbita apropiată, încheind astfel procesul invers celui precedent. Or, cum pe orbita a doua electronul a avut o energie mai mare decît cea corespunzătoare primei orbite, prin revenirea electronului la orbita fundamentală atomul va emite diferența de energie.

Lucrurile se petrec asemănător dacă electronul se află pe oricare din celelalte orbite mai îndepărtate; întotdeauna el va trece spontan pe una dintre orbitele mai apropiate de nucleu. Desigur că în aceste cazuri valoarea energiei emise de atom va fi corespunzătoare diferențelor diferitelor nivele, cumulîndu-se în cazul unor treceri succesive, pe orbite cu nivele energetice din ce în ce mai mici. În cazul unor treceri succesive pe diverse orbite, chiar dacă valoarea totală a energiei corespunde, prin cumulare, diferenței dintre nivelele energetice extreme, salturile electronului vor fi evidențiate prin cuante discrete, corespunzînd fiecărei orbite ocupate.

Toate cele spuse despre comportarea electronului în atomul de hidrogen pot fi extinse și la atomii celorlalte elemente, în care lucrurile se petrec, în general, la fel.

Cînd cel puțin unul dintre electronii unui atom ocupă orbite mai îndepărtate decît cele normale, de energie minimă, se spune că atomul este în *stare excitată*. Într-un atom excitat, un electron poate reveni pe orbite succesive inferioare și astfel poate emite cuante de energie de diverse valori; dar, întrucît fiecărei orbite îi corespunde un anumit nivel energetic, electronul nu poate face decît salturi între nivele energetice fixe. Corespunzător, atomul poate emite doar valori bine determinate de energie. Astfel, un atom poate emite o anumită energie E numai dacă în acesta există două orbite libere, astfel încît diferența nivelelor lor energetice să fie egală cu E.

Teoria lui Bohr a primit o confirmare strălucită în domeniul spectroscopiei. Aplicînd teoria sa la calculul valorii unei constante (anume constanta lui Rydberg), pe care experimentatorii au determinat-o cu mare precizie, cele două valori au fost identice.

Principiul de corespondență: un compromis?

Ideea lui Bohr, de a combina principiile fizicii clasice cu unele generalizări ale ipotezelor introduse de Planck și Einstein (în contrast cu fizica clasică) s-a dovedit un instrument util pentru explicarea unor fenomene care se petrec în lumea microcosmosului. Dar, dacă se observă spectrul de emisie al unui element, de pildă cel al hidrogenului, se poate constata că liniile nu au toate aceeași intensitate: unele sînt mult mai slabe decît altele. Această constatare a dus din nou la un impas: dacă teoria lui Bohr permite calculul frecvențelor liniilor spectrale, ea nu dă nici un fel de mijloc pentru calculul intensităților relative ale liniilor și nici în legătură cu gradul lor de polarizare.

O nouă dificultate pentru fizicieni. Teoria clasică a electromagnetismului se dovedește superioară, într-un anume sens, întrucît ea furnizează mijloacele pentru a determina toate caracteristicile liniilor: frecvență, intensitate și polarizare. Chiar dacă frecvențele observate nu corespund teoriei clasice (de aceea Bohr și-a formulat postulatele), aceasta furnizează însă metode mai ample de cercetare.

În fața unei astfel de situații, Bohr — care cu toate contradicțiile fundamentale dintre teoria cuantică și teoria clasică încerca să folosească orice concept clasic, modificat convenabil, pentru completarea teoriei sale — a introdus un principiu nou: *principiul de corespondență*.

Bohr a pornit de la considerația că atunci cînd o linie spectrală este produsă de un salt al electronului de pe o orbită mult mai îndepărtată pe una din orbitele de nivel inferior (căreia, evident, îi corespunde un nivel energetic mai mic față de orbita îndepărtată), frecvența liniei emise, calculată cu relațiile cuantice, *tinde să corespundă* cu frecvența care se poate calcula cu metodele fizicii clasice. Aceasta cu atît mai exact cu cît ambele orbite sînt mai îndepărtate de nucleu. În aceste condiții limită, teoria cuantică coincide cu teoria clasică. De fapt, acestea sînt rezultatele calculului și experiențelor.

Înarmat cu aceste date, Bohr a încercat să remedieze lipsurile teoriei sale, care nu ofereau nici un mijloc pentru a calcula intensitatea relativă și polarizarea liniilor spectrale. Mai precis, el a propus ipoteza că intensitatea și starea de

polarizare a unei linii corespund intensității și stării de polarizare a unei linii corespondente care ar fi emisă de același sistem potrivit teoriei clasice, și că această corespondență tinde să devină identitate pentru numerele cuantice mari; dar rămîne contradicția în ceea ce privește frecvențele liniilor, pe care teoria clasică nu o poate explica.

În acest sens, există o corespondență între legile fizicii clasice și fizica cuantică; de aici numele de principiu de corespondență dat de Bohr ipotezei sale. Deci, în unele limite, noua fizică a cuantelor se „contopește" cu fizica clasică.

Principiul de corespondență introduce restricții asupra teoriei cuantice, dar nu trebuie să se considere că el le determină în mod unic. Nu există reguli prin care să se precizeze cum se trece de la o descriere clasică la o descriere cuantică. Relațiile corecte ale fizicii în aceste domenii „de frontieră" sînt găsite prin intuiție clarvăzătoare, condusă de un mare număr de rezultate experimentale și supusă apoi unor verificări de laborator suplimentare.

Introducerea principiului de corespondență, care nu avea nici o justificare teoretică, la o primă vedere ar părea o acțiune arbitrară. Dar o dată ce a fost confirmat empiric, principiul a devenit un instrument extrem de valoros în dezvoltarea ulterioară a teoriei cuantelor, deoarece a permis, în unele cazuri, să se ajungă la rezultate cantitative, cît și la noi teorii.

Îmbunătățiri: probabilitate și spin

Experiențele fizicienilor au confirmat direct, pentru anumiți atomi, existența diverselor stări energetice, cu valori discrete ale energiei și astfel au demonstrat valabilitatea formulei care leagă frecvența radiației emise cu diferența de energie dintre două stări cuantice. Toate rezultatele acceptau modelul lui Bohr, în care orbitele electronilor erau considerate circulare. Pînă în 1916, cînd fizicianul Arnold Sommerfeld a extins ipotezele lui Bohr referitoare la atomul de hidrogen, considerînd orbitele ca fiind eliptice în loc de circulare și aplicînd mișcării electronului nu teoria clasică a lui Newton, ci relațiile relativiste ale lui Einstein.

Modelul planetar al atomului nu trebuie considerat decît ca o încercare de a explica unele fenomene din lumea atomului. Cu toate că acest model a dat satisfacție în cazul particular al atomului de hidrogen, el nu corespunde realității, fiind tot o aproximare. Chiar Bohr privea teoria sa ca pe un pas intermediar în căutarea unor date noi, care să ducă mai departe teoria atomică. Totuși, pentru a parcurge pas cu pas etapele de descifrare a microcosmosului, modelul planetar se menține ca o aproximație necesară, eliminîndu-se treptat elementele însoțitoare pe măsură ce teoria primește coerență.

Mergînd pe acest drum, al descifrării treptate, încercarea lui Sommerfeld a dus la o consecință foarte importantă. Mai precis, el a găsit că nici orbitele eliptice pe care le poate parcurge electronul în jurul nucleului nu sînt echidistante între ele, ca treptele unei scări; ci ele sînt reunite în grupuri, care au primit numele de *straturi electronice*. Energiile orbitelor care formează un strat diferă între ele, dar diferențele sînt foarte mici. O scară construită pe acest principiu ar fi formată din grupuri de cîteva trepte foarte apropiate între ele, fiecare grup fiind separat de celelalte printr-o distanță relativ mare.

S-a convenit ca straturile electronice să fie notate cu literele K, L, M, N,..., pornind de la cel mai apropiat de nucleu. Nu toate straturile conțin același număr de orbite: de pildă, stratul K are 2 orbite, stratul L are 8 orbite, stratul M are 18 orbite, stratul N are 32 orbite etc.

Ipoteza lui Sommerfeld a reușit să explice dificultățile interpretării spectrului de emisie al hidrogenului, atunci cînd s-au folosit spectrometre cu mare putere de rezoluție. Anume, s-a constatat experimental că liniile din spectru nu sînt simple, ci fiecare linie este alcătuită din numeroase linii foarte fine, apropiate între ele.

Acum se părea că totul a fost explicat, că teoria atomică perfecționată de Sommerfeld și-a atins forma definitivă. Dar n-a fost să fie așa nici de data aceasta. Experimentatorii au anunțat unele noi complexități ale spectrelor precum și unele anomalii magnetice ale atomilor, fenomene care, evident, cereau cuvenitele explicații...

Este momentul în care fizica începe să facă apel din ce în ce mai mult la matematică, colaborare care cu timpul va deveni extrem de fructuoasă în descifrarea fenomenelor din microcosmos. Astfel, în 1917, Einstein introduce coeficienții de probabilitate la studiul atomului încadrat în modelul lui Bohr.

Potrivit acestei noi interpretări, un atom emite energie cînd unul dintre electronii săi orbitali face un salt de pe o orbită mai îndepărtată pe una mai apropiată, adică pe o orbită căreia îi corespunde un nivel energetic mai scăzut. Dar nu se poate prevedea *cînd* se va petrece un salt de o anume energie, sau *cît timp* un electron se rotește pe o anume orbită. Chiar Bohr a scris: „trebuie să se renunțe la descrierea comportamentului individual al electronilor în timp și spațiu și să ne imaginăm că Natura poate face, printre alte posibilități, o alegere liberă care nu este supusă decît unor considerații de probabilitate".

În ipoteza sa, Einstein consideră că un electron planetar al unui atom, care se rotește pe o orbită bine determinată fără a fi însă de cea mai mică energie, are o anumită probabilitate, independentă de condițiile externe, de a trece spontan, într-un anume interval de timp, să se rotească pe o orbită mai apropiată de nucleu. Pe de altă parte, dacă un atom este „lovit" de o radiație a cărei frecvență corespunde valorii unui salt între două orbite, atunci se provoacă trecerea unui electron de pe orbita cu energie mai mică, pe o orbită mai îndepărtată, iar probabilitatea ca acest salt să se producă este cu atît mai mare cu cît este mai mare intensitatea radiației care lovește atomul.

Introducerea sistematică a factorilor de probabilitate în teoria cuantică va avea o mare importanță pentru dezvoltările sale ulterioare, fapt care la început nu a fost previzibil.

Dar în afara precizărilor făcute, fizicienii căutau în continuare explicații pentru complexitățile apărute la studiul spectrelor de emisie și de absorbție ale atomilor, precum și pentru fenomenele de feromagnetism și paramagnetism prezentate de unele substanțe. Astfel că teoria atomică acceptată pînă atunci a fost completată cu o nouă ipoteză, care pe lîngă că a dat explicațiile cuvenite, s-a dovedit de importanță fundamentală pentru dezvoltarea în continuare a fizicii atomice.

Este vorba de ipoteza fizicienilor Uhlenbeck și Goudsmit, din 1925, care au presupus că un electron nu numai că se rotește pe orbita sa în jurul nucleului (mișcare de revoluție), dar, în același timp, se rotește și în jurul axei proprii. Adică din nou o analogie cu sistemul planetar: electronul, ca și Terra, are o mișcare de revoluție și una de rotație.

În consecință, electronul, prin mișcarea sa de rotație (în jurul unei axe care trece prin baricentrul său) primește proprietăți asemănătoare unui giroscop în mișcare rapidă (de sfîrlează), care, după cum se știe, își conservă astfel o direcție bine determinată în spațiu. Dar în urma faptului că electronul are și sarcină electrică, rezultă că prin rotire el se comportă ca un mic magnet, avînd axa polilor paralelă cu axa de rotație. Cu alte cuvinte, dacă se află într-un cîmp magnetic, axa se orientează pe direcția acestui cîmp.

După cuvîntul englez „spin" (rotație) a intrat în uzanță noțiunea de *spin* al electronului. Prin aceasta se indică momentul cinetic al electronului, care nu este altceva decît o mărime mecanică prin care se măsoară viteza de rotație a particulei (și sensul în care se face rotația: spre dreapta sau spre stînga, cum se va vedea în continuare).

Aplicînd aceleași legi cuantice elaborate de Bohr, fizicienii au dedus că un electron are totdeauna un același spin bine determinat (adică, în esență, are totdeauna aceeași viteză de rotație).

Pentru o precizare cantitativă, dacă se presupune ca unitate de măsură mărimea $h/2\pi$ (unde h este constanta lui Planck), se obține că electronul are totdeauna spinul egal cu $1/2$.

Dar aplicarea legilor cuantice mișcării de rotație a electronului a dus la încă o descoperire importantă. Anume, dacă electronii se comportă ca mici magneți, ei pot avea doar două poziții atunci cînd sînt introduși într-un cîmp magnetic extern, în timp ce axa lor se orientează pe direcția cîmpului: ori au același sens cu cîmpul, ori au sensul contrar. Cu alte cuvinte, spinul electronului poate fi paralel sau respectiv antiparalel față de direcția cîmpului magnetic exterior; deci dacă se introduc semnele de orientare, spinul poate avea doar două valori: $+1/2$ și $-1/2$.

Valorile deduse teoretic pentru spinul electronului au permis să se interpreteze cuantic proprietățile optice și magnetice. Dar faptul cel mai interesant s-a petrecut peste cîțiva ani, cînd fizicianul P.A.M. Dirac își pregătea teza sa prin care introducea relativitatea în teoria cuantică; el a ajuns la un rezultat care arăta că *este necesar* ca electronul să posede un spin și un moment magnetic, avînd chiar valorile deduse anterior de Uhlenbeck și Goudsmit.

Ștefan Procopiu

În zilele noastre se știe că spinul și momentul magnetic, precum și valorile lor numerice sînt proprietăți esențiale ale oricărui electron, fără ca prin aceasta să se formeze imaginea greșită că în realitate electronii sînt mici sfere care se rotesc în jurul lor. Totuși, uneori, chiar dacă este impropriu, pentru a descrie intuitiv proprietățile electronului, se face apel la această imagine, deja depășită, a electronului care se rotește în jurul său.

De asemenea, în prezent, se știe că nu numai electronul are spin, ci toate particulele din microcosmos au spin, a cărui valoare constituie o proprietate caracteristică.

În mișcarea sa pe orbită, electronul formează un curent circular închis. Iar un curent circular închis reprezintă ceea ce fizicienii numesc „foiță magnetică", adică un cîmp magnetic orientat perpendicular pe planul conturului curentului închis.

În anul 1913, pe baza unei concepții originale, fizicianul Ștefan Procopiu (1890—1972) a demonstrat că acest cîmp magnetic este o unitate minimă a magnetismului, numind-o magneton atomic, calculîndu-i totodată și mărimea. Cu doi ani mai tîrziu, fizicianul Niels Bohr a ajuns la aceleași concluzii. Această unitate de magnetism este azi numită magnetonul Bohr-Procopiu. Renumitul dicționar *Who's Who in Science* menționează că Șt. Procopiu este „cel dintîi care a calculat momentul magnetic al electronului".

Discriminare în microcosmos: principiul excluziunii

Mișcarea electronului în jurul nucleului a continuat să-i preocupe pe fizicieni. Întrucît se știa că în atomul de hidrogen există un singur electron satelit, acesta, evident, se va roti singur pe orbita corespunzătoare energiei sale; în condiții normale, după cum se știe, electronul se va roti pe orbita cea mai apropiată de nucleu. Dar dacă se iau în considerare atomi cu masa mai mare decît cea a hidrogenului, adică ai elementelor cu număr atomic mai mare decît 1, în jurul nucleelor acestor atomi se rotesc mai mulți electroni. Mai precis, după cum se știe, vor fi atîția electroni cît este numărul atomic al elementului. (Numărul atomic este egal cu numărul care exprimă sarcina nucleului, dacă se ia drept unitate de sarcină valoarea sarcinii electrice a unui electron, *e*.)

De pildă, atomul de heliu are doi electroni. În condiții normale, adică atunci cînd atomul se află în starea fundamentală, s-ar putea face ușor presupunerea că ambii se vor roti pe orbita cu nivelul energetic cel mai scăzut, adică cea mai apropiată de nucleu. La fel, s-ar putea presupune că cei trei electroni orbitali ai atomului de litiu aflat în starea fundamentală s-ar roti, de asemenea, pe orbita cea mai apropiată de nucleu.

Dar lucrurile nu stau așa. În 1925, fizicianul W. Pauli, studiind spectrele metalelor alcaline a dedus că pe fiecare orbită a unui atom nu se poate roti decît un singur electron. Acest fapt poate fi verificat pentru orice fel de atom și de aceea este considerat ca un principiu fundamental al fizicii, fiind numit *principiul lui Pauli* sau *principiul de excluziune*.

Principiul de excluziune s-a dovedit a avea consecințe extrem de fecunde, fiind totodată cheia cu care s-a putut explica sistemul periodic al elementelor, care constituie o lege fundamentală a naturii.

După cum s-a menționat, a fost acceptată ipoteza că orbitele pe care le pot parcurge electronii sînt grupate în straturi (*K*, *L*, *M*, *N*,...), dintre care cel mai apropiat de nucleu este stratul *K*, dotat cu două orbite. Urmează stratul *L* cu 8 orbite, stratul *M* cu 18 orbite etc. Potrivit principiului de excluziune, după care pe o orbită se poate roti un singur electron, stratul *K* poate conține doar doi electroni, stratul *L* doar 8 electroni, stratul *M* doar 18 electroni etc.

De asemenea, se știe că în atomii aflați în starea fundamentală, electronii sateliți tind să ocupe orbitele cele mai apropiate de nucleu; însă potrivit principiului de excluziune acest lucru este posibil numai dacă orbitele respective nu sînt încă ocupate.

Deci, în condiții normale, într-un atom de hidrogen, unicul electron se mișcă pe una din cele două orbite ale stratului K. În elementul cu numărul atomic 2 (heliul), cei doi electroni vor ocupa cele două orbite ale stratului K, completîndu-l.

Această configurație, a unui atom care are un strat complet, este deosebit de stabilă; înseamnă că heliul, de pildă, nu poate lua parte la reacțiile chimice decît cu o foarte mare dificultate. O comportare similară o vor avea toate elementele ale căror atomi prezintă o astfel de configurație, fiind constituiți din nuclee și din unul sau mai multe straturi complete de electroni. De pildă, neonul, cu straturile K (2 electroni) și L (8 electroni) complete etc. Toate aceste elemente, care au proprietăți chimice asemănătoare, sînt gazele nobile.

În cazul litiului (care are numărul atomic $Z=3$), cel de-al treilea electron, nemaiavînd loc pe stratul K, va ocupa orbita corespunzătoare nivelului energetic cel mai scăzut din stratul L. Acest al treilea electron, deoarece se rotește pe o orbită mai îndepărtată de ceilalți doi electroni, rezultă că este mai puțin legat de aceștia. De aceea, atomul de litiu are o oarecare tendință să piardă pe cel de-al treilea electron și să se transforme astfel într-un ion pozitiv monovalent. O comportare asemănătoare o va avea și atomul de sodiu, cu 11 atomi sateliți, dintre care cel mai îndepărtat se rotește în jurul unei formațiuni stabile formate din nucleu și straturile K și L complete. La fel se petrec lucrurile și cu atomii de potasiu, rubidiu etc., care au fiecare cîte un electron pe o orbită îndepărtată de nucleu și astfel mai puțin legat de restul formațiunii. Toate aceste elemente, care au proprietăți chimice asemănătoare, sînt numite *alcaline*.

O situație oarecum diferită o întîlnim în cazul unor straturi exterioare incomplete. De pildă, în cazul fluorului ($Z=9$), din cei 9 electroni, doi completează stratul K, iar ceilalți 7 electroni ocupă orbite din stratul L. Cum stratul L are opt orbite și deoarece fiecare strat complet are o structură deosebit de stabilă, acest atom, tinzînd spre starea stabilă, are tendința să capteze un electron din exterior, pentru a-și completa stratul, transformîndu-se astfel într-un ion negativ monovalent. O comportare analoagă o au clorul, bromul etc., adică toate elementele la ale căror straturi exterioare ale atomilor le lipsește cîte un singur electron pentru a fi complete. Aceste elemente sînt numite *halogeni*.

Cu noțiunile amintite mai sus se poate acum ușor explica ce se întîmplă atunci cînd, de pildă, un atom de sodiu se unește cu un atom de clor pentru a forma o moleculă de clorură de sodiu. Atomul de sodiu (Na), un alcalin, tinde să piardă electronul exterior, transformîndu-se în ion pozitiv (Na^+), în timp ce clorul (Cl), un halogen, are tendința să capteze un electron din exterior, transformîndu-se în ion negativ (Cl^-). Acești doi ioni, avînd sarcini electrice de semne contrare se atrag și se unesc, formînd împreună o moleculă de clorură de sodiu, neutră din punct de vedere electric.

Acesta a fost un exemplu simplu, de principiu. Nu la toți compușii legăturile se fac atît de simplu, reacțiile respective prezentînd o oarecare complexitate. Toate acestea fac însă obiectul de studiu al chimiei, care, la rîndul ei, folosește din plin teoria structurii atomice în explicarea fenomenului de reacție.

Una dintre problemele cele mai pasionante de descifrarea microcosmosului a constituit-o emisia radiațiilor electromagnetice, ca efect al saltului electronilor pe orbitele atomului. Urmele acestor salturi erau atent observate cu spectroscoape, iar spectrele erau fotografiate pentru măsurători exacte.

Mecanismul emiterii radiațiilor era cunoscut fizicienilor. Un atom emite o cuantă de energie cînd trece printr-un salt de pe o orbită mai îndepărtată pe o orbită mai apropiată de nucleu. Potrivit relației lui Planck, $\varepsilon = h\nu$, energia ε este emisă sub forma unei radiații electromagnetice de frecvență ν. Din cauză că orbitele nu sînt echidistante din punct de vedere al nivelului lor energetic, atomul poate emite o gamă vastă de radiații electromagnetice. De pildă, unui salt al electronului între două orbite mai îndepărtate îi corespunde o radiație electromagnetică de frecvență mult mai mică decît a unui salt al electronului între două orbite mai apropiate de nucleu. Astfel, cele două categorii de radiații amintite mai sus pot fi luminoase (pentru salturi între orbitele mai îndepărtate), respectiv pot fi radiații X (pentru salturi între orbitele mai apropiate), trecînd peste domeniul radiațiilor ultraviolete și radiația X moale.

Acesta este mecanismul emisiei tuturor radiațiilor electromagnetice, de la cele infraroșii, pînă la radiațiile X. Emisia de radiații gama, care au frecvența mai mare decît cea a radiațiilor X, au un mecanism de emisie oarecum diferit, care se va analiza în capitolele următoare.

O dispută celebră: Newton și Huygens

Teoria atomică a lui Bohr-Sommerfeld a avut o importanță enormă în istoria fizicii atomului, dominînd pînă în anul 1925; totodată a constituit o călăuză pentru teoreticieni și pentru experimentatori, cărora le-a permis să interpreteze și să prevadă multe fenomene din lumea atomului. Pe baza acestui model a fost posibil să se construiască o teorie rațională a distribuției electronilor sateliți, pe orbite grupate în diverse straturi, prin care s-au putut explica proprietățile chimice și spectroscopice ale elementelor. Chiar și tabelul sistemului periodic, alcătuit de Mendeleev pe baze empirice, a putut fi interpretat și explicat cu o simplitate elegantă.

Și totuși, o serie de obiecții au dat la iveală faptul că modelul Bohr-Sommerfeld, chiar după introducerea conceptului de spin al electronului, nu răspundea la toate întrebările experimentatorilor. De pildă, nu îndeplinea condițiile fundamentale ale unei teorii, în sensul că regulile o dată stabilite ar trebui ca ele și numai ele să fie aplicate și să explice fenomene. Or, în teoria lui Bohr, pe parcurs, nu numai că au fost modificate regulile inițiale de cuantificare pentru a o face să corespundă cu rezultatele experimentale, ci au fost introduse chiar noi reguli și ipoteze, care nu erau sugerate de premisele inițiale. Apoi, teoria lui Bohr interpreta satisfăcător doar spectrele hidrogenului, dar se arăta neputincioasă în interpretarea spectrului heliului, elementul cel mai simplu după hidrogen, fără a mai menționa elementele mai grele. Iar acuzația cea mai gravă era că teoria nu reușea să interpreteze polarizarea liniilor spectrale; singurul lucru pe care l-a făcut a fost ca prin principiul de corespondență să se revină la mecanica și electromagnetismul clasic.

Bohr era perfect conștient de toate acuzațiile aduse teoriei sale, el însuși fiind primul care sublinia insistent caracterul provizoriu al modelului său, arătînd că era necesar să se deschidă noi căi, independente de legile clasice.

Noile căi au fost deschise și parcurse de fizicieni; s-au elaborat teorii care se deosebeau din punct de vedere conceptual de teoria lui Bohr. Pentru zilele noastre, teoria lui Bohr poate fi considerată ca o teorie intermediară, care a stabilit o punte de legătură între conceptele vechi și cele noi. Prin aceasta, încă o dată știința a folosit aproximațiile succesive pentru a face pași înainte.

Deci, fizicienii se aflau din nou în căutarea unei teorii, mai rafinate, care să înlocuiască modelul Bohr-Sommerfeld. Se contura din ce în ce mai mult convingerea că era necesară o revizuire profundă a principiilor fizicii teoretice. Evident, situația devenise critică, și aceasta deoarece nu existau rațiuni care să se opună la reprezentarea printr-un model intuitiv a tuturor entităților atomice, chiar dacă ar putea forma obiectul unor legi care să poată fi exprimate prin relații matematice.

Lucrurile s-au stabilizat oarecum după anul 1925, cînd în fizica teoretică începea să se contureze o nouă direcție, cunoscută sub numele de mecanică cuantică. Ea s-a dezvoltat prin trei forme distincte: mecanica ondulatorie a lui Louis de Broglie, metoda matricelor a lui W. Heisenberg și metoda operatorilor a lui P.A.M. Dirac și Jordan. Cele trei forme sînt matematic echivalente între ele, diferind doar prin anumite elemente de concepție. Se poate prefera oricare dintre cele trei forme, fiecare din ele reprezentînd, de fapt, perfecționări ale teoriei clasice a cuantelor (cum a fost numită teoria Bohr-Sommerfeld).

Cele trei forme ale noii direcții de studiere a microcosmosului au însă o caracteristică deosebită. Renunțînd la căutarea unui model intuitiv, ele folosesc un aparat matematic complex, cu o simbolistică aparte. Din aceste motive, dată fiind schema matematică deosebit de abstractă pe care o folosește fiecare dintre cele trei forme, în special metoda operatorilor, noțiunile vehiculate nu pot fi redate simplu.

Totuși, unele elemente ale mecanicii ondulatorii și ale metodei matricelor pot fi înțelese fără a apela la aparatul matematic asociat.

Mecanica ondulatorie își are oarecum originea în încercarea de a găsi un răspuns la întrebarea: ce este lumina? Deși, probabil, preocuparea oamenilor de a răspunde la întrebare se pierde în negura istoriei, abia în secolul al XVII-lea

a fost atacată mai serios, de doi mari fizicieni: Huygens și Newton.

C. Huygens a publicat un tratat asupra luminii, în 1690, în care afirma categoric că lumina are o natură ondulatorie, că ea reprezintă o vibrație mecanică, fiind asemănătoare sunetului. Pe baza acestei ipoteze el a dedus legile reflexiei, ale refracției și a interpretat dubla refracție. Dar această idee, a naturii ondulatorii a luminii apărea atît de stranie, încît a fost categoric combătută.

Nici Newton nu a acceptat-o și și-a propus (chiar a impus-o) propria sa teorie corpusculară, potrivit căreia lumina ar fi compusă din corpuscule extrem de mici și cu o viteză extrem de mare, care în orice mediu omogen și transparent se propagă rectiliniu. (Totuși, el a atribuit acestor corpusculi și unele proprietăți ondulatorii.)

Disputa dintre cele două teorii a durat două secole și jumătate, fără ca vreuna din ele să triumfe în final. Fără îndoială că această confruntare asupra naturii luminii a constituit una dintre cele mai curioase aventuri din istoria fizicii.

Newton și-a impus teoria corpusculară nu numai în lumea științifică, ci chiar în cercurile largi ale publicului, circulînd ca „teorie oficială" timp de peste un secol. Pînă în 1815, cînd Fresnel a fost convins că fenomenul de interferență, cunoscut de peste un secol, nu poate fi explicat decît de teoria ondulatorie. Apoi, explicarea fenomenului paradoxal rezultat din interferență, că „lumina adăugată luminii dă întuneric", a dat cîștig definitiv de cauză teoriei ondulatorii, renunțîndu-se la teoria corpusculară.

Dar mai lipsea o explicație asupra mecanismului de producere a luminii. Abia în 1865, printr-o strălucită demonstrație matematică, J.C. Maxwell a ajuns la un sistem unic de ecuații, dedus din legile curentului electric, din care a reieșit existența undelor electromagnetice. El a scris: „am motive temeinice să cred că chiar lumina este o formă de radiație electromagnetică, ce ascultă de aceste ecuații".

Teribila dilemă: undă sau corpuscul?

Toate măsurătorile făcute au confirmat concepția electromagnetică asupra luminii, sugerată de Maxwell. Pînă la începutul secolului XX, optica ondulatorie a fost supusă

unui număr enorm de experiențe, verificîndu-se de fiecare dată natura sa ondulatorie. Nimeni nu-și mai imagina că în urma unor atît de categorice rezultate va mai fi pusă vreodată în discuție valabilitatea teoriei ondulatorii a luminii. Și totuși, evenimentul s-a produs atunci cînd Einstein, studiind legile unui fenomen curios, numit ulterior fenomenul fotoelectric, a fost obligat să propună, fie chiar sub o nouă formă, o teorie corpusculară a luminii.

În esență, efectul fotoelectric poate fi explicat astfel: dacă se lasă să cadă un fascicul de lumină, de mică lungime de undă (ultraviolete sau radiații X), pe o suprafață metalică, aceasta emite electroni, care sînt „expulzați" cu o anumită energie, care, evident, le este transferată de radiația incidentă. Pînă aici fenomenul pare simplu. Dar s-a observat că energia (în ultimă instanță viteza) cu care sînt expulzați electronii nu depinde de *intensitatea* radiației incidente, ci crește o dată cu *frecvența* acestei radiații. Cu alte cuvinte, electronii expulzați sub incidența radiațiilor X au o viteză mai mare decît a electronilor emiși sub incidența radiațiilor ultraviolete.

Or, această dependență a vitezei electronilor de frecvența radiației incidente nu putea fi explicată pe baza teoriei ondulatorii a luminii; deoarece, potrivit acestei teorii, energia undei incidente crește o dată cu intensitatea. Deci, o radiație de aceeași frecvență, dar mai intensă, ar trebui să producă electroni cu o viteză mai mare. Dar experiențele arătau că lucrurile nu stăteau tocmai așa!

Interpretînd rezultatele, Einstein a publicat, în 1905, un memoriu, devenit apoi celebru, în care a arătat că felul de comportare al electronilor în efectul fotoelectric, care nu putea fi explicat pe baza teoriei ondulatorii a luminii, era ușor de interpretat dacă se acceptă că lumina ar avea o comportare corpusculară, presupunînd că ar fi formată din cuante de energie, numite de el *fotoni*. Fiecare foton de frecvența ν are o energie egală cu $h\nu$, unde h este constanta lui Planck.

Noua concepție poate explica efectul fotoelectric. Cînd un foton întîlnește un electron dintr-un atom al metalului, cedează energia sa electronului și astfel electronul se desprinde din atom și iese la suprafața metalului. A spune că o radiație de o anume frecvență este mai intensă decît alta de aceeași frecvență, înseamnă că fotonii care vin în unitatea de timp sînt în număr mai mare, fiecare foton avînd însă

Albert Einstein

aceeași energie (dacă radiația este monocromatică). Aceasta explică de ce *viteza* electronilor care sînt scoși din metal este independentă de intensitatea radiației incidente (cu condiția ca frecvența acestei radiații să rămînă neschimbată). Se observă că elementul variabil în aceste evenimente este doar *numărul* electronilor, care crește o dată cu creșterea intensității radiației incidente (adică o dată cu creșterea numărului fotonilor).

Dar fenomenul mai prezintă o curiozitate, bineînțeles explicabilă: dacă frecvența radiației incidente este mai mică decît o anume valoare, energia fiecărui foton va fi prea mică pentru a reuși să smulgă un electron din metal. Acesta este motivul pentru care efectul fotoelectric nu poate fi produs prin iluminarea unei suprafețe metalice cu lumină normală (din spectrul vizibil), a cărei frecvență este prea mică.

O dată cu explicarea fenomenului fotoelectric prin reconsiderarea teoriei corpusculare sub forma teoriei fotonilor, se părea că s-a ajuns din nou la vechea dilemă, care a bîntuit timp de două secole: lumina este de natură ondulatorie sau corpusculară? Fiecare din aceste teorii explica unele fenomene, dar nu era compatibilă cu alte fenomene.

Trebuie însă făcută o precizare. Teoria fotonică nu este o teorie pur corpusculară a radiației, în sensul că lumina ar

fi formată din corpusculi materiali după cum a susținut Newton. În teoria fotonilor a apărut un element nou, necorpuscular: frecvența. Or, frecvența care apare în definiția dată de Einstein este cea din teoria ondulatorie! Deci, teoria fotonică constituie, mai degrabă, un fel de legătură între aspectul ondulatoriu al luminii și aspectul corpuscular dedus din efectul fotoelectric.

Iată că, din nou, fizicienii aveau la dispoziție două teorii asupra naturii luminii. Pentru moment au acceptat situația și foloseau cînd o teorie, cînd alta, după specificul fenomenelor pe care le studiau. Era o situație de care chiar fizicienii făceau haz. Astfel, cu o tristă ironie, fizicianul W. Bragg scria: „lunea, miercurea și vinerea acceptăm una din ipoteze; marțea, joia și sîmbăta cealaltă ipoteză".

„Teribila dilemă" l-a preocupat și pe fizicianul L. de Broglie. El scrisese: „Chiar forma relației lui Einstein ne invită să asociem concepția corpusculară cu cea ondulatorie într-un astfel de mod încît ambii termeni ai relației să aibă semnificație fizică".

L. de Broglie, impresionat de faptul că relația dintre frecvență și energie, așezată de Einstein la baza teoriei fotonice, lega intim dualismul (undă-corpuscul) radiației de existența cuantelor, s-a întrebat dacă acest dualism nu ar fi o manifestare a naturii cuantei lui Planck. Dacă, altfel spus, nu cumva se va manifesta același dualism oriunde va fi prezentă constanta lui Planck?

În aceeași ordine de idei, știindu-se că potrivit teoriei lui Bohr în proprietățile electronului intervine constanta lui Planck (prin care a demonstrat faptul că un atom se poate afla doar în anumite stări energetice), lui de Broglie i-a venit spontan întrebarea: oare, electronul nu prezintă și el un dualism analog celui al luminii? Sau, în general: oare, nu ar trebui să se atribuie particulelor materiale și un aspect ondulatoriu? De aici, el a presupus că ar fi posibil ca electronii să posede caracteristici ondulatorii.

Evident, o astfel de idee apărea teribil de îndrăzneață, dacă nu chiar fantastică. Niciodată electronul nu și-a dezvăluit vreo proprietate ondulatorie, ci, dimpotrivă, în fenomenele macroscopice s-a comportat întotdeauna ca un punct material. Totuși, de Broglie s-a bazat pe faptul că în fenomenele atomice electronul nu ascultă de legile mecanicii

clasice, deci proprietățile sale nu pot fi cele ale unui punct material.

Intuiția lui de Broglie s-a dovedit inspirată. El a sugerat să se atribuie electronului, și în general tuturor particulelor elementare (adică constituenților atomului: electroni, protoni, particule alfa) „o natură dublă, analoagă celei a fotonului, acordîndu-le un aspect dublu, ondulatoriu și corpuscular, bazat pe cuanta lui Planck".

Astfel, prin asocierea fotonilor cu undele radiațiilor, Louis de Broglie emite ipoteza că trebuie să existe o asociație analoagă între particulele materiale și un anume fenomen periodic, un nou tip de undă (undă de Broglie), a cărei natură este încă necunoscută.

Pentru o particulă de masă m care se deplasează într-o anume direcție cu o viteză v, unda de Broglie are o lungime de undă egală cu h/mv, unde h este constanta lui Planck. Dacă constanta ar fi mai mică decît este în realitate, se poate deduce că particula materială ar fi asociată unei unde avînd lungimea de undă mai mică, deci proprietățile ondulatorii ale materiei ar fi mai greu observabile. Această constatare arată că proprietățile ondulatorii ale materiei sînt, în esență, manifestări cuantice. Într-un univers în care $h = 0$, aceste manifestări nu ar exista. (După ultimele determinări, constanta lui Planck are valoarea $h = 6{,}626196 \cdot 10^{-34}$ J.s.)

Dar forma inițială a teoriei lui de Broglie, deși avea o formulare matematică a noilor unde, se baza pe aceleași condiții de cuantificare folosite de Bohr și deci, la fel, nu putea explica poziția liniilor spectrale.

Lucrurile au fost lămurite, în 1926, de E. Schrödinger, care, folosind un aparat matematic adecvat, a dat o nouă față teoriei lui de Broglie. Mai întîi, el a scris explicit ecuațiile undelor mecanicii ondulatorii, apoi, calculînd pozițiile liniilor spectrale, a obținut rezultate care, în multe cazuri, sînt diferite de cele obținute de teoria clasică a cuantelor, dar sînt mult mai de acord cu rezultatele experimentale.

În fața unor formulări și calcule atît de exacte ale ipotezei sale, de Broglie scria: „Pe cît de frumoase ar fi ideile generale și metodele fundamentale ale mecanicii ondulatorii, pe cît de precise au fost verificările pe care le-a obținut cu previziunile exacte ale fenomenelor atomice, concepțiilor le mai lipsește verificarea experimentală directă".

Louis de Broglie

Această experiență crucială a teoriei lui L. de Broglie a fost făcută în 1927 de Davisson și Germer. Cei doi fizicieni urmăreau, de fapt, alte fenomene, dar printr-un accident al aparaturii au constatat că un fascicul de electroni lenți care lovesc un corp solid cristalin (care are o structură atomică regulată) dă naștere unui fenomen de difracție analog celui care apare cînd cristalul este lovit de un fascicul de raze X (deci radiații electromagnetice cu frecvența mai mare decît a luminii). În felul acesta a fost confirmată strălucit valabilitatea ipotezei lui de Broglie, care a atribuit electronului un aspect ondulatoriu.

Mai mult, calculele făcute pe baza experiențelor lui Davisson și Germer au dat, pentru lungimea de undă asociată electronului, aceeași valoare care a fost calculată teoretic de L. de Broglie.

Potrivit teoriei, fiecărui corpuscul material în mișcare îi este asociată o undă. Asta ar însemna că ar trebui să se observe fenomene de difracție pentru orice particulă, de pildă pentru grăunțele de nisip... Dar lucrurile nu se petrec așa, deoarece pentru o viteză dată a corpusculului lungimea de undă asociată este cu *atît mai mică* cu cît masa corpusculului este *mai mare*. De aceea, numai pentru corpusculi de masă extrem de mică (care sînt tocmai particulele subatomice)

lungimea de undă asociată este suficient de mare pentru a putea produce fenomene observabile cu mijloacele obișnuite.

Cu alte cuvinte, deși teoria este generală, numai pentru radiații electromagnetice avînd lungimi de undă mici (ultraviolete, X și gama) precum și pentru particule elementare (electroni, protoni etc.) se pot pune în evidență aspectul corpuscular și aspectul ondulatoriu cu ajutorul mijloacelor noastre experimentale existente în prezent.

Dar dilema undă-corpuscul continua să preocupe lumea științifică. Atîta timp cît dualismul era limitat la radiații, se putea presupune că acesta punea în evidență o nouă proprietate a acelei necunoscute entități care era lumina. Dar după ce L. de Broglie a extins dualismul la întreaga materie, s-a înțeles că știința se afla în fața unui principiu general, avînd o semnificație deocamdată necunoscută.

Nu au lipsit încercările de interpretare. Prima a fost chiar a lui de Broglie. El a presupus că singura realitate o reprezintă undele, iar manifestările corpusculare se datoresc doar caracteristicilor undelor; adică, dublul aspect al luminii și al materiei nu s-ar datora faptului că în natură ar exista independent unde și corpusculi. În concluzie, De Broglie consideră că undele constituie elementele fundamentale ale naturii, iar corpusculii ar fi un fel de „subproduse"...

Ipoteza lui de Broglie a fost însă repede respinsă, din cauza unor dificultăți în susținere. Dar de Broglie n-a renunțat și a făcut o nouă tentativă, propunînd o interpretare diferită, de data aceasta acceptînd că atît undele, cît și particulele au o existență fizică independentă. Potrivit acestei interpretări, unda nu determină traiectoria reală parcursă de particulă, ci ea „pilotează" particula de-a lungul uneia din traiectoriile care sînt asociate oricăror procese ondulatorii.

Dar și această ipoteză a lui de Broglie, numită „a undei pilot", nu a rezistat criticilor, în special prin aceea că se contrazicea cu teoria relativității.

Concepții noi: mecanica matriceală și principiul de nedeterminare

Fără îndoială că o dată cu abordarea problemei dualismului undă-corpuscul, fizicienii s-au aflat în fața uneia dintre cele mai dificile etape ale cunoașterii lumii particulelor elementare.

Werner Heisenberg

După nereușitele lui de Broglie, alți fizicieni au căutat să iasă din impas, elaborînd noi interpretări. Dintre acestea s-a impus teoria lui Heisenberg care, în 1925, a creat o nouă mecanică, perfect coerentă. Plecînd de la un sistem organic de postulate, noua teorie poate deduce toate rezultatele folosind o metodă unitară. Aparatul matematic folosit de Heisenberg este așa-numita teorie a matricelor, un capitol al matematicii care deși era cunoscut de mult matematicienilor, nu a avut încă aplicații în domeniul fizicii. Complexitatea acestui aparat matematic face dificilă explicarea mecanicii lui Heisenberg în termeni simpli, dar oricum pot fi înțelese ideile de la care s-a pornit, precum și semnificația ei aplicată la lumea microcosmosului.

Heisenberg a pus la baza teoriei sale un principiu logic fundamental, anume că nu trebuie să fie introduse în fizică mărimi ce nu pot fi măsurate prin intermediul unei experiențe care să fie posibilă de a fi realizată practic sau, cel puțin, să fie conceptual posibilă și că nu poate fi realizată doar din rațiuni practice, adică insuficiența instalațiilor experimentale existente.

În această ordine de idei, se știe că fenomenele care au loc în interiorul unui atom se pun în evidență prin intermediul spectrelor de emisie; mai exact, ceea ce poate fi observat este poziția liniilor spectrelor atomului și intensitatea lor. Deci, Heisenberg a formulat legile care guvernează fenome-

nele subatomice prin relații care leagă între ele doar *intensitatea* și *frecvența* radiațiilor emise de atomi. Pentru a stabili relațiile directe între aceste cantități observabile, el a folosit algebra matriceală.

Aceasta este originea mecanicii matriceale a lui Heisenberg. Referindu-se la lucrările succesive ale lui Heisenberg, Jordan și Dirac la completarea mecanicii matriceale, Bohr avea să scrie că: „au dat rapid o formă care, prin coerență și generalitate, poate rivaliza cu mecanica clasică".

După ce Heisenberg și-a publicat rezultatele obținute cu ajutorul mecanicii matriceale, Schrödinger — care, mergînd pe ideea lui de Broglie, a scris ecuațiile de undă ale mecanicii ondulatorii — a observat că cele două mecanici, deși plecînd din două puncte de vedere atît de diferite, au ajuns la același rezultat. Orice problemă se poate rezolva cu oricare din cele două metode, după dorință și după pregătirea matematică a cercetătorului. Avantaje? Metoda matricelor este mai rapidă, în timp ce mecanica ondulatorie este mai ușor de mînuit.

În încercările sale de a stabili legile lumii subatomice, Heisenberg a căutat să respecte principiul că orice concept care urmează să fie folosit în fizică trebuie să poată fi definit prin ceea ce se numește *definiție operativă*. Este vorba de o serie de operații fizice care să fie conceptual posibile. Adică, Heisenberg susținea că este necesar ca în considerațiile teoretice să fie analizate cu multă atenție toate raționamentele, pentru a se evita folosirea unor concepte care nu sînt definite de o definiție operativă. Heisenberg a obținut primul succes prin aplicarea acestui concept în fizica atomică, elaborînd *principiul de nedeterminare*, care a avut o importanță enormă în înțelegerea mecanicii matriceale.

Conceptul de definiție operativă aplicat fenomenelor atomice exclude unele operații care sînt obișnuite în fizica lumii macroscopice. De pildă, pentru a cunoaște poziția unui corp, în viața cotidiană, este suficient să fie iluminat pentru a fi observat sau fotografiat. Dar dacă este vorba de un electron nu este posibil să se procedeze la fel, și aceasta nu din rațiuni de tehnică, ci conceptuale. Anume, dacă iluminăm electronul, acesta, lovit de o cuantă de lumină, va primi un impuls și se va pune în mișcare pe o direcție și cu o viteză imposibil de prevăzut. Deci poziția electronului se modifică prin faptul că dorim să-l observăm. Evident, obser-

varea unui corp în lumea macrocosmosului nu are nimic de suferit dacă îl iluminăm, din cauza masei sale relativ mari.

Exemplul simplu de mai sus arată cîtă atenție trebuie acordată atunci cînd se extrapolează concepții valide într-o anumită zonă de fenomene, într-o altă zonă, mult diferită.

Heisenberg a publicat, în 1927, un memoriu în care a demonstrat și comentat principiul de nedeterminare, arătînd că este o consecință logică a fundamentelor mecanicii sale matriceale. Principiul stabilește care este precizia maximă care se poate obține în măsurarea simultană a poziției și a vitezei unei particule elementare.

Trebuie însă multă atenție în interpretarea „preciziei maxime", amintită mai sus. Aici este vorba de „precizia maximă *teoretică* ce se poate obține". Posibilitatea unei determinări experimentale simultane a poziției și vitezei unei particule elementare este exclusă nu din motive de instalații tehnice sau de abilitatea experimentatorului, ci deoarece există rațiuni teoretice care împiedică astfel de determinare. De fapt, s-a arătat mai sus ce se poate întîmpla unui electron iluminat pentru a fi observat: cuanta incidentă îi transmite un impuls și astfel electronul va cîștiga o viteză suplimentară, care va fi în funcție de energia cuantei.

Dar poziția unei particule elementare poate fi determinată cu orice precizie. Pentru a-i obține imaginea este suficient să fie utilizată o radiație cu o lungime de undă suficient de mică: raze X sau raze gama. Dar radiațiile de lungime de undă mică înseamnă radiații de frecvență mare, deci cuante de energii mai mari. În consecință, viteza particulei lovită de cuantă poate crește într-un interval mai mare. Deci, cunoașterea valorii vitezei este subiectul unei nedeterminări cu atît mai mari cu cît mai precisă este măsura poziției.

Invers, dacă se imaginează o experiență care permite să se măsoare viteza unei particule elementare, se constată că cu cît este mai mare precizia cu care dispozitivul permite să se măsoare viteza, cu atît mai mult rămîne nedeterminată poziția particulei, după ce s-a făcut măsurarea vitezei. Adică, dacă nedeterminarea uneia dintre cele două mărimi este foarte mică, nedeterminarea celeilalte este foarte mare.

Dar principiul de nedeterminare nu are numai acest aspect intuitiv, de „povestire"; există și o evaluare canti-

tativă a sa: produsul intervalului de nedeterminare al poziției unei particule cu cel al intervalului de nedeterminare al vitezei sale are o valoare constantă, anume este egal cu constanta lui Planck, h, divizată prin valoarea masei particulei.

Relația cantitativă este valabilă, în general, pentru două mărimi conjugate astfel: poziția și viteza unei particule, timpul și energia, intensitatea electrică și intensitatea magnetică a cîmpului electromagnetic într-un punct în spațiu etc.

Principiul de nedeterminare a fost confirmat cantitativ în nenumărate experiențe în lumea subatomică; el nu este însă contrazis nici în lumea macrocosmosului. Dar cum în această situație masa corpului este mare, valoarea raportului menționat mai sus, h/m, este foarte mică și fenomenul de nedeterminare este neobservabil.

Bohr intervine din nou: principiul de complementaritate

Mecanica ondulatorie, mecanica matriceală și principiul de nedeterminare au adus precizări de o mare importanță pentru lumea microcosmosului, dar nu au lămurit dilema fizicienilor în legătură cu dualismul undă-corpuscul. Trebuia să mai aibă loc o conciliere între cele două concepții reprezentate prin mecanica clasică pe de o parte și mecanica cuantică pe de altă parte.

Punctul de plecare este trăsătura principală sub care ne-a obișnuit fizica clasică să fie privite fenomenele. Adică, atunci cînd un astronom descrie, de pildă, mișcarea Lunii, el o prezintă ca o mișcare ce are loc în spațiu și în timp, independentă de faptul că este supusă unei observări. Mai mult, mișcarea continuă identic, cu aceleași caracteristici, chiar dacă nici un astronom nu ar ridica vreodată ochii să o observe. În schimb (după cum s-a mai arătat) lucrurile nu stau la fel atunci cînd se intenționează observarea unei particule atomice; în acest caz se produce o alterare sau, după cum a scris Bohr: „dispare separarea dintre obiectul observat și observator".

Distincția care se face între sistemul observat și observator, în cazul fenomenelor macroscopice ce au loc în cadrul

fizicii clasice, are drept consecință un determinism riguros. Potrivit determinismului, evoluția oricărui sistem fizic poate fi reprezentată printr-o succesiune continuă de evenimente legate cauzal. Un exemplu tipic al felului cum mecanica clasică satisface principiul cauzalității îl reprezintă teoria lui Newton a mișcării planetelor, teorie care a constituit unul dintre cele mai mari succese ale mecanicii. Teoria susține că dacă la un anume moment se cunosc poziția și viteza unei planete, se pot calcula cu precizie poziția și viteza planetei într-un moment următor. Se poate deci spune că viitorul și chiar trecutul sistemului observat este complet determinat cînd se cunoaște starea sa prezentă.

Dar în timp ce fizica clasică poate fi definită ca fiind complet deterministă, situația se prezintă cu totul diferit în cazul teoriei cuantice. În lumea atomică, în care dispare separarea dintre sistemul observat și observator, de fiecare dată cînd se face o observare, pentru sistemul observat apare un fapt nou și necontrolabil. Ca urmare, posibilitatea de a determina exact și simultan datele privind starea prezentă a obiectului observat — de pildă poziția și viteza unei particule elementare — nu mai există. Nu se mai poate preciza dacă starea prezentă a particulei va putea determina stările ei viitoare.

În fața unei astfel de imposibilități de a aplica principiul cauzalității apar două interpretări. Pe de o parte se poate spune că drept consecință a existenței cuantei de energie nici o observație nu poate conduce la cunoașterea simultană a poziției și a stării de mișcare a unei particule elementare fără a nega prin aceasta existența unei traiectorii și a unei mișcări bine determinate ale particulei. Pe de altă parte însă, se poate admite că particula nu are, în general, nici poziție, nici traiectorie și nici mișcare bine determinate; în orice moment, parametrii pe care fizica clasică îi atribuie particulei (coordonatele, componentele mișcării etc.), nu ar avea valori bine definite, ci numai o serie de valori cu oarecare probabilitate posibile. Doar în momentul în care se efectuează o măsurătoare a unui parametru, acesta primește o valoare precisă. Însă o dată cu creșterea informării noastre asupra acestei mărimi, crește gradul de ignorare a mărimii conjugate, care ar putea fi, de pildă, din perechile: poziție-

viteză, timp-energie etc. Cei mai mulţi fizicieni s-au asociat celei de a doua interpretări.

În acest context, Heisenberg şi-a formulat principiul de nedeterminare, care a dus la abandonarea teoriei clasice a cauzalităţii în lumea microcosmosului.

Şi de data aceasta a intervenit Bohr, aducînd în ajutor o nouă ipoteză de compromis. Este vorba de postularea unui nou principiu, care permite interpretarea fenomenelor fizicii atomice cu aspect paradoxal, în special dualismul undă-corpuscul prezentat de lumină (adică, în general, de radiaţiile electromagnetice), cît şi de materia sub formă de substanţă.

Consideraţiile lui Niels Bohr au pornit de la faptul că stabilirea unei relaţii între un efect dat cu o cauză dată are sens numai dacă este posibil să fie observate atît efectul cît şi cauza, fără a perturba în nici un fel evenimentul. Dar, după cum s-a văzut anterior, în fizica atomică acest lucru nu este posibil. Însă pentru a localiza evenimentul în spaţiu şi timp trebuie să fie făcute observaţii, căci numai astfel se va putea afla unde acesta se verifică într-un anume moment. Apoi, o localizare precisă în spaţiu şi timp este asociată unei nedeterminări în cursul transformării şi invers, o legătură riguroasă între cauză şi efect poate fi descrisă numai dacă se renunţă la o localizare precisă în spaţiu şi timp.

Bohr a generalizat aceste idei, elaborînd *principiul de complementaritate*: „În studiul fenomenelor atomice nu se poate realiza simultan o riguroasă localizare în timp şi spaţiu, şi o riguroasă descriere cauzală". Potrivit acestui principiu, localizarea spaţio-temporală şi descrierea cauzală sînt complementare: ele reprezintă două aspecte diverse ale realităţii, care nu pot fi descrise simultan.

Principiul de complementaritate a spulberat dilema dublei naturi a luminii şi, în general, a materiei. Pur şi simplu, se poate chiar spune că dilema nici nu există! Iată cum a fost depăşit impasul: proprietăţile asociate naturii ondulatorii (ale luminii sau particulelor elementare) şi proprietăţile asociate naturii corpusculare sînt complementare; ele nu se pot manifesta niciodată împreună în cadrul aceluiaşi experiment, deoarece acest lucru este interzis de principiul de nedeterminare. Cînd se face o experienţă care pune în lumină proprietăţile ondulatorii (de exemplu o experienţă de difracţie), aceasta provoacă o perturbare care face de nerecunoscut natura corpusculară. Iar dacă se face o experienţă care pune în evidenţă natura corpusculară, devin nedefinite şi de nerecunoscut proprietăţile asociate naturii ondulatorii.

Ca o încununare a rezolvării dualismului undă-corpuscul, cel care l-a adus în lumea fizicii, L. de Broglie, a scris: „Proprietăţile ondulatorii şi corpusculare nu intră niciodată în conflict, pentru că nu există simultan. Se aşteaptă tot timpul un duel între undă şi corpuscul; dar acesta nu va avea loc niciodată; totdeauna este prezent doar unul dintre cei doi adversari".

Capitolul 4

RADIOACTIVITATEA ȘI TRANSMUTAȚIILE

O proliferare neașteptată: izotopii

O primă imagine a nucleului atomic a fost aceea că ar fi un corpuscul unitar, caracterizat doar prin masă și sarcina sa electrică pozitivă. Dar o dată cu descoperirea radioactivității, această imagine a devenit incompletă.

Cum la nivelul experimentelor și observațiilor directe, cu aparatură de laborator relativ simplă, mai erau încă posibil de descoperit suficiente fenomene, care să pună semne de întrebare, mulți fizicieni au început cercetări sistematice. Astfel că în perioada care a urmat punerii în evidență a dezintegrării radioactive a unor elemente, în urma unui număr uriaș de experiențe ce urmăreau studierea fenomenului, a fost semnalat un fapt ce apărea ca foarte straniu. Examinîndu-se cu metode chimice proprietățile elementelor ce se formau în urma dezintegrării diverselor elemente radioactive, s-a constatat că, în unele cazuri, proprietățile chimice a două elemente (despre care se știa cu certitudine că sînt diferite între ele) erau atît de asemănătoare încît atunci cînd erau amestecate nu puteau fi separate prin nici o metodă chimică.

Fizicianul F. Soddy, în 1907, studiind fenomenele radioactive, a constatat că, în unele cazuri, nu era posibil să se separe cu metode chimice două elemente care, de altfel, erau foarte diferite din punct de vedere al proprietăților lor radioactive. El a dedus că aceste elemente au mase atomice diferite, deși au același număr atomic Z. (După cum se știe, Z este numărul de ordine al unui atom în sistemul periodic al elementelor și este egal cu numărul de electroni orbitali ai atomului elementului.)

Concluzia lui Soddy este logică, știind că proprietățile chimice ale unui element (și în mare parte chiar și proprietățile fizice) depind de numărul electronilor orbitali ai atomului său. Deci, dacă în natură există două elemente diferite și care nu se pot distinge din punct de vedere chimic, atunci

atomii lor trebuie să aibă același număr de electroni orbitali. De asemenea, cele două elemente trebuie să ocupe același loc în sistemul periodic al elementelor. Dar mai există un aspect: atunci cînd atomii diferitelor elemente se deosebesc unii de alții, există diferențe fie între numărul electronilor lor orbitali (deci a sarcinii electrice a nucleului), fie prin masa nucleului. Rezultă deci foarte clar că două elemente diferite care au același număr de electroni orbitali pot diferi doar prin masa nucleului lor.

Întrucît elementele „în cauză" ocupă același loc în sistemul periodic al elementelor, au fost numite *izotopi* (în l. greacă *isos* înseamnă *egal*, iar *topos — loc*).

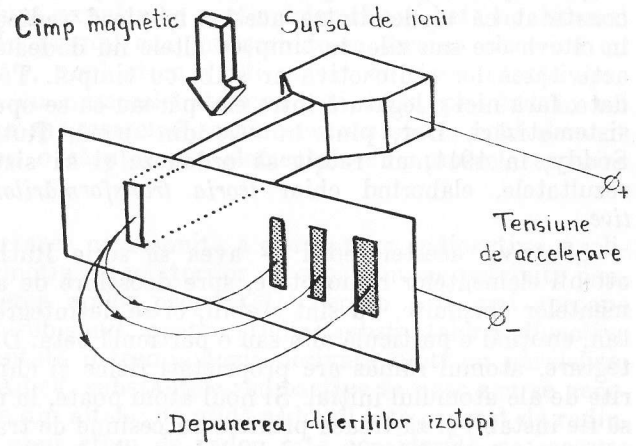


Fig. 9. Spectrograful de masă.

Astfel, de pildă, există două elemente care au numărul atomic 17 (clorul), identice din punct de vedere chimic, dar care au masele atomice diferite: 35 și respectiv 37. Clorul care se găsește în natură este un amestec de izotopi, în proporții diferite. De aceea, chimiștii, determinînd masa atomică a clorului, au găsit un număr zecimal: 35,45...

Mulțumită unui dispozitiv numit *spectrograf de masă* s-a constatat că, în realitate, cea mai mare parte a elementelor chimice sînt formate dintr-un amestec de izotopi. Dacă în natură există 92 de elemente distincte din punct de vedere

chimic, numărul speciilor de atomi diferiți între ei prin masa nucleară este de circa 240.

Izotopii au complicat dintr-o dată „contabilizarea" elementelor chimice. Ei se comportau neașteptat; nu toți erau stabili. Uneori se formau ca produse ale unor elemente radioactive, dezintegrîndu-se apoi la rîndul lor într-un timp relativ scurt, ce diferea de la un izotop la altul.

Legea deplasării și transmutațiile

La începutul secolului al XX-lea, cercetările asupra radioactivității au scos la iveală o mare cantitate de informații. Au fost găsite numeroase substanțe radioactive, s-a constatat că unele dintre acestea își pierd radioactivitatea în cîteva ore sau zile, în timp ce altele nu dădeau semne că activitatea lor radioactivă ar slăbi cu timpul. Toate aceste date, fără nici o legătură între ele, păreau că se opun oricărei sistematizări. Dar, pînă în cele din urmă, Rutherford și Soddy, în 1911, au reușit să ordoneze și să sistematizeze rezultatele, elaborînd chiar *teoria transformărilor radioactive*.

„Potrivit acestei teorii — avea să scrie Rutherford — atomii elementelor radioactive, spre deosebire de atomii elementelor obișnuite, nu sînt stabili, ci se dezintegrează spontan, emițînd o particulă alfa sau o particulă beta. După dezintegrare, atomul rămas are proprietăți fizice și chimice diferite de ale atomului inițial. Și noul atom poate, la rîndul său, să fie instabil și să treacă printr-o succesiune de transformări caracterizate, la fel, prin emisiuni de particule alfa sau beta". La acestea se mai poate adăuga că fiecare proces de dezintegrare este însoțit de emisiunea de cuante de energie, respectiv fotoni gama.

Pentru a ne face o imagine despre cum se modifică un atom după emisia unei particule alfa sau beta, trebuie urmărit, în fiecare caz, ce fel de transformări se produc în interiorul său. În cazul emisiei unei particule alfa (număr atomic 2 și masa atomică 4), masa nucleului radioactiv se micsorează cu 4 unități, în timp ce emisia unei particule beta (electron) nu modifică practic masa nucleului, deoarece masa electronului este de circa 1 800 de ori mai mică decît cea a celui mai ușor nucleu, al hidrogenului.

Dar pe lîngă modificările de masă, se modifică și sarcina electrică. Particula alfa avînd o sarcină electrică +2, iar un electron sarcina —1, atunci cînd un nucleu radioactiv emite o particulă alfa sarcina sa se micșorează cu 2 unități, iar cînd emite o particulă beta, sarcina sa pozitivă crește cu o unitate.

Din aceste considerații a apărut o lege: *legea deplasării*, potrivit căreia dacă un nucleu radioactiv emite o particulă alfa, masa sa se micșorează cu 4 unități și sarcina sa electrică se micșorează cu 2 unități, iar dacă se emite o particulă beta, masa sa rămîne neschimbată și sarcina sa electrică crește cu o unitate

„Deplasarea" se referă la locul pe care îl ocupă atomii rezultați după expulzarea particulelor alfa și beta în sistemul periodic. În primul caz, micșorîndu-se sarcina electrică cu două unități, noul atom va fi plasat cu două căsuțe spre elementele cu numerele atomice mai mici, pe cînd în cel de-al doilea caz, crescînd sarcina cu o unitate, noul element va trece cu o căsuță spre elementele cu numerele atomice mai mari.

Comportarea neobișnuită a elementelor radioactive a solicitat imaginația cercetătorilor de a găsi nume potrivite pentru descrierea noilor proprietăți. Pentru a fi mai aproape de limbajul obișnuit, pentru studiul substanțelor radioactive a fost adoptată o terminologie derivată dintr-un paralelism cu viața. Adică, substanțele radioactive se nasc sau se generează unele din altele; de pildă radonul este generat de radiu. Formarea unui atom de radon este considerată ca *moartea* unui atom de radiu și *nașterea* unui atom de radon; se mai spune că radiul este substanța *mamă* a radonului. De asemenea, se numește *viață* a unui atom timpul care trece de la nașterea sa pînă la moartea sa.

Asemănarea limbajului merge mai departe; substanțele radioactive sînt organizate în *familii*. Toate substanțele radioactive sînt generate de uraniu și de toriu, strămoșii a trei familii diferite: familia uraniului, familia actiniului și familia toriului. Dintre acestea, familia uraniului numără cei mai mulți „urmași".

După o viață mai scurtă sau mai lungă, toți componenții celor trei familii sfîrșesc în același fel: se transformă în elemente stabile, care sînt izotopi ai plumbului.

În afara substanțelor radioactive care aparțin acestor trei familii, în natură mai există și altele, care nu aparțin însă grupului elementelor grele. Acestea sînt: izotopul cu masa atomică 152 al samariului, care are o viață de cîteva sute de miliarde de ani (10^{11} ani), izotopul cu masa atomică 40 al potasiului, care are o viață de ordinul a 100 milioane de ani și care, printre produsele de dezintegrare, dă argonul (cu masa atomică 40), care este prezent în atmosferă, apoi rubidiul și, în mai mică măsură, lutețiul.

Radioactivitate și probabilitate

Deși spontană, radioactivitatea s-a dovedit a se supune totuși unor anumite reguli. Mai întîi s-a constatat experimental că legea după care se dezintegrează atomii radioactivi este foarte simplă: numărul atomilor care se dezintegrează pe secundă este proporțional cu numărul total al atomilor nedezintegrați prezenți. Cu alte cuvinte, de pildă, dacă din 10 atomi dintr-o substanță radioactivă dată, într-o secundă se dezintegrează 3 atomi, atunci într-un eșantion din acea substanță care conține 100 000 de atomi, într-o secundă se vor dezintegra 3 000 de atomi. În ceea ce privește care atomi urmează să se dezintegreze, evenimentele se petrec absolut la întîmplare.

În pofida faptului că fenomenul de radioactivitate este guvernat de întîmplare și duce în final la dezintegrarea treptată a atomilor, legea de mai sus este aceeași pentru toate substanțele radioactive. Dar ceea ce variază enorm de la o substanță radioactivă la alta este *rata dezintegrării* sau *ritmul dezintegrării*, concretizat prin cantitatea care se dezintegrează într-un timp dat.

Pentru a putea evalua cantitativ marile deosebiri între ratele dezintegrării, a fost introdusă o nouă mărime: *timpul de înjumătățire* sau *perioada radioactivă*. Prin aceasta se înțelege timpul în care jumătate dintr-o cantitate de substanță radioactivă se dezintegrează. Cu alte cuvinte, perioada radioactivă reprezintă timpul necesar ca o anumită cantitate din substanța respectivă să se reducă la jumătate.

Înarmați cu această noțiune, fizicienii au avut posibilitatea să folosească un limbaj mai precis pentru descrierea substanțelor radioactive. Ei au stabilit că perioada radioactivă variază pentru diferitele substanțe, de la cîteva miliarde de ani la fracțiuni extrem de mici de secundă. De pildă toriul are o perioadă de 14 miliarde de ani, radiul de 1 590 ani și toriul C′ de doar o miliardime de secundă.

O constatare interesantă a fost făcută cu prilejul determinării perioadelor radioactive a substanțelor care reprezintă fiecare „capul unei familii": toriul, actiniul și uraniul. Aceste substanțe sînt caracterizate prin perioade foarte lungi, comparabile, ca ordin de mărime, cu vîrsta Terrei, apreciată la circa 5 miliarde de ani. Astfel se poate explica faptul că pe Pămînt există încă aceste substanțe radioactive. Dacă, de pildă, perioada uraniului ar fi fost de numai cîțiva ani, el ar fi dispărut de mult de pe Terra și o dată cu el întreaga sa familie. Dar uraniul se dezintegrează lent, regenerînd în continuare toată seria urmașilor. La fel se comportă și ceilalți „capi de familie", toriul și actiniul.

Ritmul dezintegrării radioactive se bucură de proprietatea că este constant pentru o anume substanță. Nu numai că este constant față de orice condiții fizice și chimice, dar și față de vîrsta substanței. De pildă, un atom de radiu are azi o oarecare probabilitate de a se dezintegra. Dar dacă peste 1 000 de ani nu s-a dezintegrat, în ziua respectivă va avea aceeași probabilitate de dezintegrare ca și azi, pentru următoarele 24 de ore. Nimeni nu poate ști cît timp poate trăi un atom; el se poate dezintegra în secunda următoare sau ar putea trăi încă peste secole. Dar un lucru este sigur: dacă există un oarecare număr de atomi ai elementului respectiv, după un timp egal cu perioada sa radioactivă aceștia se vor reduce la jumătate.

Fizicianul J.H. Jeans, remarcînd probabilitatea constantă a atomului de a se dezintegra indiferent de starea sa trecută sau prezentă, a scris: „aceasta este o lege naturală *de un tip încă necunoscut științei* și urmările sale, cum se va vedea imediat, erau imense. De la Democrit la Newton și pînă în secolul al XIX-lea știința a susținut că prezentul era determinat de trecut; noua știință, în schimb, avea să susțină ceva cu totul diferit și anume că în evenimentele considerate în prezent, trecutul nu pare să aibă influență asupra prezentului și nici prezentul asupra viitorului".

Fizicienii se aflau acum din nou în fața unui fenomen care nu se încadra în modul clasic de interpretare potrivit legii cauzalității, făcîndu-se apel la conceptul de probabilitate.

Desigur, au fost și păreri că ar exista unele cauze intime misterioase, necunoscute încă omului, care ar explica de ce unii atomi trăiesc doar cîteva secunde, pe cînd alții, care se află în aceleași condiții supraviețuiesc un timp îndelungat... Or, astfel de presupuneri n-au nici o bază experimentală; în plus, mecanica cuantică afirmă că este lipsită de sens chiar căutarea acestei cauze, evenimentele fiind supuse conceptului de probabilitate.

Se naște însă o întrebare. Cum este posibil ca membrii unei familii radioactive, deși cîțiva au o viață foarte scurtă, să poată exista în jurul substanței mamă? Răspunsul, că între substanța mamă și membrii familiei există un proces de regenerare continuă trebuie însă precizat printr-o noțiune nouă: echilibrul radioactiv.

Se consideră, de pildă, cazul transformării radiului în radon. Presupunem că se supune observării o cantitate de radiu, după ce au fost eliminate toate produsele de descompunere (radon, poloniu etc.). Radiul se va dezintegra continuu (perioada circa 1 600 ani), generînd radon (perioada 4 zile), care, la rîndul său, generează poloniu (perioada 3 minute). Dar numai o mică parte a radonului format se dezintegrează; deci, într-o primă etapă cantitatea de radon crește. O dată cu această creștere, se mărește și numărul nucleelor sale, care se dezintegrează. La un anumit moment se formează tot atîți atomi de radon din radiu, cîți atomi de radon se dezintegrează transformîndu-se în poloniu! Din acest moment cantitatea de radon rămîne constantă, adică se spune că „radiul și radonul sînt în *echilibru radioactiv*".

Echilibrul radioactiv se stabilește între toți produșii transformării unei substanțe, dacă aceștia nu sînt îndepărtați din jurul „capului de familie". Și deoarece viața celor trei „capi de familie" este enorm de lungă, activitatea lor poate fi considerată „cu atît mai constantă" vizavi de cazul radiului discutat mai sus. De aceea, măsurînd, printre altele, cantitatea de radiu din diversele tipuri de roci uranifere, s-a găsit că procentele de uraniu și radiu sînt totdeauna aceleași.

Dar viața agitată a familiilor radioactive naturale au un același sfîrșit „cenușiu". Este vorba de ultimul produs al dezintegrărilor radioactive, plumbul, care este comun celor trei familii radioactive. Măsurătorile au arătat că și cantitatea de plumb stabil care se formează în unitatea de timp ca rezultat al dezintegrării succesive a uraniului, toriului sau

actiniului este constantă. Deoarece plumbul este un element stabil, el se acumulează în roci. De aici geologii au fost înzestrați cu o metodă simplă de determinare a vîrstei rocilor, doar măsurînd cantitatea relativă de plumb conținută de acestea.

Determinarea vîrstei rocilor. Timp îndelungat geologii și geofizicienii au fost preocupați de a găsi o metodă pentru a determina vîrsta rocilor sau, mai precis, de a cunoaște epoca în care diversele roci au ajuns în starea solidă în care se află în prezent. Dezintegrarea spontană a elementelor naturale radioactive le-a pus la dispoziție un mijloc pentru a rezolva această problemă.

De fapt, dezintegrarea radioactivă este un fenomen care se desfășoară cu regularitate, constituind un cronometru natural, constant, insensibil la influențele externe care pot fi întîlnite în procesele geofizice: temperatura și presiunea. Dezintegrarea se desfășoară în timp cu o viteză bine determinată, într-un asemenea mod încît permite să se „citească" istoria unei anumite cantități de substanță și să se stabilească, de pildă, ce procent dintr-un gram de uraniu va fi „în viață" peste... un mileniu sau ce cantitate inițială de uraniu a fost acum un milion de ani, dacă în prezent a rămas numai... un gram.

Metoda de calculare a vîrstei unei roci uranifere se bazează pe faptul că uraniul are acea lungă perioadă radioactivă, de ordinul miliardelor de ani și se transformă pe rînd în toți membrii familiei sale, sfîrșind prin a deveni plumb. Pe de altă parte, este perfect cunoscut timpul în care dintr-o anume cantitate de uraniu se formează o anume cantitate de plumb. Deci, din măsurarea procentului de uraniu și izotopul plumbului cu care se află împreună, se calculează timpul care a fost necesar pentru o astfel de transformare.

După numeroase calcule s-a apreciat că rocile cele mai vechi au o vîrstă de circa 4 miliarde de ani și, fapt deosebit de important, s-a găsit că cei mai vechi meteoriți au și ei aceeași vîrstă.

Iată cum, în istoria Terrei, substanțele radioactive au funcționat ca un orologiu foarte precis, care a continuat să „bată" și în zilele noastre, ducînd și viitorului mesajul care descrie formarea rocilor.

Dar unde se găsesc în natură substanțele radioactive? În 1903, soții Curie au depus o muncă epuizantă de examinare a peste 7 tone de pechblendă provenită din Boemia, pentru a separa doar un singur gram de bromură de radiu. Ei au ales totuși un minereu foarte bogat în substanțe radioactive. Dacă ar fi ales, de pildă, un alt minereu, ar

fi trebuit să prelucreze o cantitate de circa 100 000 de ori mai mare pentru a obține un gram de radiu.

Substanțele radioactive se găsesc, în cantități foarte mici, prezente aproape peste tot. Fără a merge mai departe, se pot găsi urme, printre altele, în materialele de construcție, în beton, de pildă. Într-un panou de beton de dimensiuni medii pot fi găsite cîteva kilograme de substanțe radioactive, din care cea mai mare parte o reprezintă uraniul și alte elemente care, avînd o perioadă radioactivă foarte lungă, se dezintegrează foarte încet, putînd fi considerate aproape stabile. În schimb, cantitatea de substanțe radioactive de viață scurtă este minimă. De pildă, radiul conținut în același panou din beton abia poate atinge cantitatea de cîteva miligrame.

Apa mărilor și a fluviilor mari, de asemenea conține substanțe radioactive, dar în procente de circa 1 000 de ori inferioare rocilor. Dar există și izvoare naturale de ape foarte radioactive, care pot fi utilizate în diverse tratamente.

Căldura internă a Terrei. Măsurători făcute în decursul timpului au arătat că temperatura crește treptat pe măsură ce se coboară în adîncime, sub scoarța Pămîntului. Mai precis, în medie temperatura crește cu circa 1 grad la fiecare 35 m. Acesta reprezintă așa-numitul *gradient termic* al Terrei. De aici se poate trage concluzia că din profunzimile planetei se ridică un flux continuu de căldură, care se dispersează spre suprafață.

Care este originea acestei călduri, care iese continuu din adîncuri, de miliarde de ani? În orice caz, nu este o căldură ce poate fi neglijată, considerată accidentală, deoarece este întîlnită pe toată suprafața planetei, ridicîndu-se la valoarea de circa 6 miliarde de kilocalorii pe secundă (kilocaloria este căldura necesară pentru a ridica temperatura unui kilogram de apă cu un grad.)

Un calcul simplu arată că în decurs de un milion de ani, de pe fiecare centimetru pătrat al suprafeței terestre au fost emise circa 40 000 kcal.

Spre sfîrșitul secolului al XIX-lea, Kelvin și alți fizicieni au emis ipoteza că fluxul de căldură care emană din interior spre suprafață ar fi o relicvă de pe timpul cînd Terra era în stare fluidă și avea o temperatură foarte ridicată. Dar făcînd cîteva calcule, Kelvin a găsit că, în această ipoteză, gradientul termic al Pămîntului ar fi fost posibil doar pe o perioadă de circa 30 milioane de ani după solidificarea scoarței terestre. Or, după cum se știe, Terra are un trecut de circa 5 miliarde de ani, astfel că ipoteza fluxului de căldură-relicvă n-a putut fi susținută.

Din ipoteza lui Kelvin a rămas ca posibil doar faptul că circa 20% din fluxul de căldură al Terrei să aibă ca origine căldura din timpul formării planetei. Pentru rest, soluția avea să fie găsită abia după descoperirea radioactivității.

Astfel, în experiențele făcute cu substanțele radioactive, în anul 1903 și următorii, soții Curie și colaboratorii au constatat că sărurile de radiu emit continuu căldură; mai precis, un gram de uraniu emite circa 2 calorii/minut, iar pînă la dezintegrarea sa completă emite... trei miliarde de calorii! Pentru a obține aceeași căldură ar trebui arse circa 400 kg cărbune.

Toate substanțele radioactive produc căldură, dar diferit de la o substanță la alta.

Pentru a explica producerea căldurii din substanțele radioactive trebuie luat în considerare faptul că ele emit spontan particule alfa și beta, precum și radiații gama. Particulele posedă energie cinetică, iar numărul mare de particule care însoțește procesul de dezintegrare conduce la un transfer de energie foarte mare, pus în evidență prin ridicarea temperaturii mediului din jur. În plus, se adaugă și energia radiațiilor gama, cu același efect de ridicare a temperaturii mediului.

În felul acesta poate fi explicat gradientul termic al Pămîntului pe seama radioactivității. Echilibrul termic stabilit între căldura scoarței și cea pierdută prin radiație de Pămînt constituie una din calitățile care au permis apariția și întreținerea vieții.

Capitolul 5

DETECTARE ŞI IDENTIFICARE

Trecerea particulelor prin substanţă

După descoperirea radioactivităţii ca fenomen, la începutul secolului al XX-lea, printr-un dispozitiv simplu (vezi fig. 4, p. 30) au fost puse în evidenţă cele trei radiaţii: alfa, beta şi gama. Acum se ştie că radiaţia alfa reprezintă de fapt un flux de nuclee de heliu (particule alfa), radiaţia beta reprezintă un flux de electroni (particule beta), iar radiaţiile gama fac parte din marea familie a radiaţiilor electromagnetice.

Dar cum au reuşit fizicienii să stabilească aceste detalii? Cum a fost organizată marea vînătoare a particulelor atomice, date fiind dimensiunile extrem de mici ale acestora?

Desigur, din cauza dimensiunilor extrem de mici ale particulelor alfa şi beta este imposibil să fie observate direct nici cu cel mai puternic microscop. Astfel că metodele de detectare trebuiau să fie indirecte, această trăsătură fiind valabilă şi în cercetările care se fac în prezent asupra particulelor subnucleare. Dacă ar fi să facem o comparaţie cu lumea din jurul nostru, de pildă, vîntul nu poate fi văzut, dar pot fi observate efectele pe care le produce: mişcă ramurile copacilor, ridică nori de praf, stîrneşte valuri pe apă, şuieră etc. Observînd aceste efecte se poate determina intensitatea vîntului şi direcţia în care suflă.

Analog, radiaţiile radioactive nu pot fi observate direct; se studiază doar efectele pe care le produc de-a lungul drumului pe care îl parcurg în diverse medii.

Atunci cînd o particulă elementară, avînd sarcină electrică şi suficientă energie, trece printr-o substanţă, în special în stare gazoasă, se va ciocni cu atomii întîlniţi în calea sa. Dar atomul poate fi considerat ca un obstacol relativ mare pentru o particulă alfa sau beta: este o zonă ocupată de „norul" electronilor ce orbitează în jurul nucleului, care în acest ansamblu reprezintă doar un minuscul punct central.

Deci ciocnirea particulelor încărcate electric, cu un atom, se reduce la ciocniri cu electronii orbitali, în timp ce o ciocnire cu nucleul, bine protejat de electronii orbitali, este un fenomen extrem de rar. De aceea, în evenimentele de ciocnire a unor particule încărcate electric, provenite din elemente radioactive, cu atomii dintr-o substanţă, fenomenul de întîlnire cu nucleul este, într-o anumită măsură, neglijabil.

În realitate şi electronii orbitali sînt extrem de mici, de aceea desele ciocniri care totuşi se petrec au constituit o surpriză. Explicaţia a putut fi dată ţinîndu-se cont că între particulele încărcate electric se exercită forţe şi atunci cînd se găsesc la distanţă una de alta. Sînt forţe de natură electrică, de atracţie sau de respingere, după cum cele două sarcini electrice implicate sînt de semne contrare sau de acelaşi semn. Deci, în evenimentele de ciocnire, electronii se comportă ca şi cum ar fi mult mai mari decît sînt în realitate.

În procesul de ciocnire, în fond o interacţie electrică, particula încărcată electric cedează electronului o parte din energia sa. Electronul, avînd acum o energie mai mare, trece pe o orbită mai îndepărtată de nucleu, corespunzînd unui nivel energetic mai mare. Această orbită va fi cu atît mai îndepărtată de nucleu cu cît este mai mare energia primită de electron. În acest caz, atomul este excitat. După un timp foarte scurt însă, electronul va reveni la un nivel energetic mai mic, emiţînd energie sub formă de lumină (fotoni).

Dar dacă energia particulei care intră în interacţie cu electronul orbital este suficient de mare sau, cu alte cuvinte, dacă după interacţie electronul va avea o energie superioară celei cu care este legat de nucleu, el va fi de-a dreptul smuls din atom, care va rămîne astfel cu o sarcină electrică pozitivă, adică se va transforma într-un ion pozitiv. După cum s-a arătat anterior, atomul se află, în acest caz, în stare ionizată.

Ionizarea atomilor substanţei, în special a unui gaz, de o particulă elementară încărcată electric, avea să joace un rol extrem de important în observarea evenimentelor lumii atomului. Partea esenţială o constituie faptul că particula, în drumul ei prin gaz, lasă în urma sa o urmă de atomi excitaţi, electroni şi ioni pozitivi; or, această urmă reprezintă chiar dovada trecerii particulei prin gaz, traiectoria sa. Observînd-o, prin metode care vor fi analizate în continuare, se pot studia proprietăţile particulei care a provocat-o.

Pe măsură ce înaintează în diverse substanțe, particula își pierde treptat energia și totodată puterea de penetrare. S-a demonstrat că în cazul diverselor particule încărcate electric, avînd toate aceeași energie inițială și care erau puse să traverseze aceeași substanță, numărul atomilor ionizați este cu atît mai mare cu cît masa particulei este mai mare.

Deci, o particulă alfa va produce un număr de ioni mai mare decît va produce un electron avînd aceeași energie inițială. De pildă, o particulă alfa emisă de nucleul de poloniu produce circa 40 000 de perechi de ioni într-un centimetru de drum parcurs într-un mediu în care presiunea și temperatura au valori normale. Întrucît după fiecare ciocnire ea cedează cîte o parte din energia sa, viteza ei va scădea pînă la zero după ce a parcurs cîțiva centimetri. În schimb un electron (particula beta) în aceleași condiții inițiale și în același mediu va produce circa 50 de perechi de ioni pe centimetrul de drum parcurs și, de aceea, puterea sa de penetrare este mult mai mare decît a particulei alfa.

Fotonii și substanța

Dar radiațiile gama? După cum s-a arătat anterior, radiațiile gama emise de o substanță radioactivă fac parte din marea familie a radiațiilor electromagnetice, din care, printre altele, mai fac parte radiațiile ultraviolete, lumina vizibilă și radiațiile X. Dintre toate, radiațiile gama au cea mai mică lungime de undă sau — folosind alt parametru — cea mai mare frecvență.

Pe de altă parte se știe că radiațiile electromagnetice de tipul luminii, radiațiilor ultraviolete și radiațiilor X sînt constituite din fotoni, emiși atunci cînd electronii orbitali ai unui atom trec de pe orbite corespunzătoare unui nivel energetic mai mare, pe orbite cu nivel energetic mai mic.

În cazul emiterii radiațiilor gama, în schimb, lucrurile sînt ceva mai complicate, deoarece ele sînt emise de nucleul atomului. Anume, fotonii radiațiilor gama sînt emiși atunci cînd un nucleu trece dintr-o stare cuantică (stare staționară de energie a unui sistem de particule) în alta, corespunzătoare unei energii mai mici.

Dar ce se întîmplă atunci cînd un foton de mare energie străbate un mediu material? În acest caz, de asemenea, fotonul pierde energie și generează perechi de ioni prin trei procese fundamentale: efectul fotoelectric (fotogenerarea), efectul Compton și materializarea (sau generarea de perechi). Unul sau altul dintre aceste trei procese au loc în funcție de energia fotonului și de masa atomică a substanței traversate.

Primul proces, numit efect fotoelectric, are loc atunci cînd fotonul ce traversează substanța are o energie suficient de mare încît poate ioniza atomul întîlnit într-o asemenea măsură încît unul dintre electronii orbitali să poată fi smuls din atom. Electronul smuls se va depărta definitiv de nucleu, avînd o energie egală cu diferența dintre energia fotonului incident și energia care a fost necesară pentru a rupe legătura dintre electron și nucleu. Acest proces, care în esență constă în absorbirea unui foton de un atom, pe de o parte, și expulzarea unui electron din atomul respectiv, pe de altă parte, constituie efectul fotoelectric.

Dar este posibil ca un foton să aibă o energie foarte mare, astfel încît, față de aceasta, energia care leagă electronul de nucleu să fie neglijabilă. În acest caz, procesul se desfășoară diferit. Electronul întîlnit de fotonul cu energie foarte mare nu se mai comportă ca fiind legat de nucleu, ci ca un electron liber, astfel încît procesul poate fi asimilat unei ciocniri elastice. Concretizînd, întîlnirea poate fi asemănată unei ciocniri la jocul de biliard, cînd se lansează o bilă contra alteia aflată în repaus. După ciocnire, prima bilă se va mișca într-o nouă direcție, cu o viteză mai mică, în timp ce bilei lovite i se va imprima o mișcare cu o anumită viteză. În procesul de ciocnire, prima bilă a pierdut energie deoarece o parte din ea a fost cedată bilei lovite, punînd-o în mișcare.

Analog, fotonul, după ce întîlnește electronul, este deviat și pierde acea parte a energiei care este cîștigată de electron, modificînd mișcarea acestuia. Ca rezultat al interacției, fotonul suferă un proces de împrăștiere, avînd totodată o energie inferioară celei inițiale.

Modificarea energiei fotonului mai atrage după sine și o altă concluzie: potrivit relației cunoscute a energiei unui foton, $\varepsilon = h\nu$, se poate ușor deduce că micșorarea energiei ε atrage după sine micșorarea frecvenței ν (h este constanta lui Planck). Deci fotonul deviat va avea totodată o frecvență mai mică decît cea inițială.

Cele arătate mai sus, în legătură cu fotonul de energie foarte mare, sînt datorate fizicianului A.H. Compton; în anul 1923 le-a prezentat ca fiind un efect fundamental, care

ulterior a primit numele de efectul Compton. Compton a observat că atunci cînd un fascicul de raze X traversează un mediu material, o parte a fasciculului este împrăștiat în toate direcțiile (la fel cum se întîmplă cu lumina cînd trece printr-un mediu tulbure); dar frecvența acestei radiații difuze este cu puțin mai mică decît cea a radiației incidente.

Nici efectul Compton nu a putut fi explicat prin legile fizicii clasice, el constituind o nouă confirmare experimentală directă a teoriei cuantice a luminii.

Bineînțeles, interesul laboratoarelor de fizică a fost mare pentru a detecta subtilitățile efectului. Astfel, s-a constatat că efectul Compton este mai pronunțat la trecerea fotonilor prin elementele înscrise la începutul tabelului periodic al elementelor; de fapt situația este explicabilă, deoarece sarcina electrică a nucleelor elementelor mai ușoare este mai mică. Deci electronii orbitali sînt mai puțin legați de nucleele atomilor respectivi, comportarea lor fiind mult mai apropiată de cea a electronilor liberi.

Pe de altă parte, este evident că pentru o substanță dată efectul este cu atît mai pronunțat cu cît energia fotonului incident este mai mare sau — ceea ce este același lucru — cu cît frecvența radiației incidente este mai mare.

Efectul fotoelectric și efectul Compton reprezintă două posibilități de a urmări drumul radiațiilor electromagnetice prin substanță. Ambele efecte depind de energia fotonilor incidenți (adică de frecvența radiației incidente) și de masa mediului traversat, respectiv de numărul atomic al elementului din care este alcătuit mediul.

Materializarea este cel de-al treilea proces fundamental care are loc la trecerea fotonilor prin substanță, numit și generarea de perechi. Și în acest proces, fotonul incident pierde energie și dispare, dar acest interesant fenomen poate avea loc numai în cazul că radiația incidentă are o frecvență extrem de ridicată, corespunzătoare unei lungimi de undă de circa... o bilionime de metru (10^{-13} m)!

Fenomenul de materializare, care constă, în esență, din apariția spontană a unei perechi de particule elementare, are loc doar atunci cînd fotonul traversează cîmpul electric al unui nucleu — mai corect spus, în imediata vecinătate a unui nucleu masiv. Va fi prezentat în una din secțiunile următoare; el face parte dintr-un studiu privind „descompunerea vidului".

Probleme tehnice

O dată ce sînt cunoscute efectele trecerii prin substanță a particulelor încărcate electric — fenomenele de excitare și de ionizare a materiei străbătute —, se pune problema de a le face vizibile și de a le măsura.

Fizicienii au astăzi la dispoziție o serie de dispozitive de detectare, care pot fi împărțite în două mari categorii: numărătoare de particule și înregistratoare de particule. Instrumentele din prima categorie dau semnale atunci cînd sînt traversate de o particulă; ele permit o localizare foarte precisă *în timp*, adică *momentul* în care trece particula, dar sînt mai puțin precise în ce privește *locul* în care a apărut particula.

Instrumentele din cea de-a doua categorie permit o bună localizare a particulelor *în spațiu* (revelînd urma lor), dar nu o pot localiza în timp.

Metoda se impune de la sine. Prin folosirea ambelor categorii de instrumente de detectare, fizicienii încearcă — cu mult succes — să determine cît mai precis traiectoria, masa, viteza și sarcina electrică a particulelor elementare care, de altfel, nu pot fi supuse observației directe.

Numărătoarele de particule au fost imaginate de cercetători în mai multe variante, după efectul pe care îl folosesc. Astfel, unele se bazează pe ionizarea provocată de particule (camere de ionizare), iar altele pe excitarea atomilor (contorul cu scintilație și contorul Cerenkov).

Cum funcționează *camera de ionizare?* Dacă substanța prin care trec particulele elementare este în stare gazoasă, prin ciocniri ele generează electroni (deci sarcini negative) și ioni pozitivi. Întrucît, desigur, aceste sarcini electrice sînt cu atît mai multe cu cît mai mulți atomi ai gazului vor fi ciocniți de particule, se poate deduce că în felul acesta este posibil să se obțină o măsură a ionizării produse de trecerea particulelor încărcate electric, numărînd sarcinile generate în gaz.

O cameră de ionizare este de o construcție foarte simplă, constînd, în esență, dintr-o incintă etanșă cu pereți subțiri, conținînd un gaz (aer, azot, hidrogen etc.), în care sînt montate plăci metalice (electrozii), polarizate pozitiv și respectiv negativ. Dacă prin gazul din incintă trece o particulă încărcată electric, gazul va fi ionizat, adică se vor produce un

număr de electroni și ioni pozitivi. Electronii, care au sarcină electrică negativă, vor fi atrași de electrodul pozitiv, iar ionii, care sînt pozitivi, vor fi atrași de placa negativă. Presiunea din interiorul incintei și tensiunile de polarizare ale electrozilor pot fi astfel potrivite încît toate particulele încărcate electric ce se formează în gaz să ajungă pe cei doi electrozi.

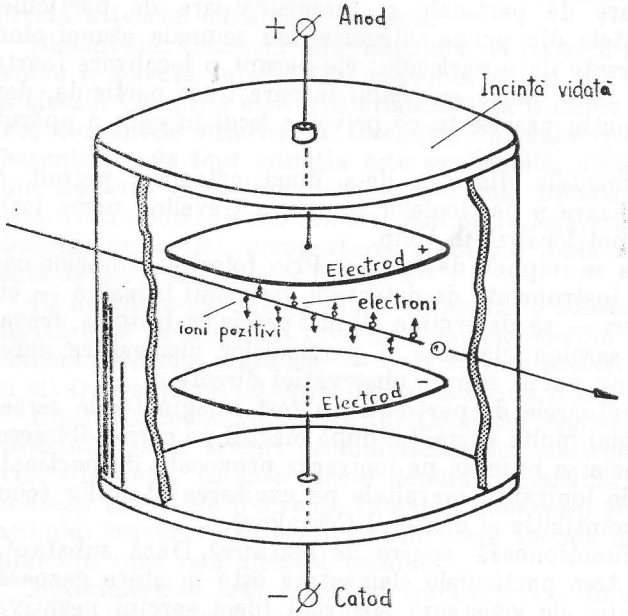


Fig. 10. Cameră de ionizare.

Dar aglomerarea de electroni pe electrodul pozitiv va duce la micșorarea sarcinii sale pozitive, în timp ce aglomerarea de ioni pe electrodul negativ va duce la micșorarea sarcinii negative a acestuia. Ca urmare, se va produce o micșorare a diferenței de potențial dintre cei doi electrozi, micșorare cu atît mai sensibilă cu cît este mai mare numărul de ioni și electroni produși în gaz, deci cu cît este mai mare numărul de particule elementare încărcate electric intrate în gazul din incintă și cu cît este mai mare puterea lor de ionizare.

Iată că astfel se ajunge și la o determinare cantitativă: valoarea micșorării diferenței de potențial dintre cei doi electrozi este o măsură a ionizării produse de trecerea particulelor prin incintă, adică prin camera de ionizare.

Bineînțeles, camera de ionizare a suferit perfecționări pentru măsurători mai precise. Așa este, de pildă, camera de ionizare cu amplificare proporțională; conectată la un amplificator (care amplifică de circa un milion de ori!), ea permite nu numai numărarea particulelor individuale care intră în camera de ionizare, ci și măsurarea perechilor de electroni pe care fiecare particulă o produce în gazul din incintă. În plus, deoarece este cunoscută energia necesară unei particule de a ioniza un atom producînd o pereche ion-electron, se poate deduce chiar valoarea energiei cedate de particulă gazului din camera de ionizare.

Mai există camere de ionizare cu lichid și cu cristale semiconductoare, a căror folosire depinde de tipul experimentului urmărit.

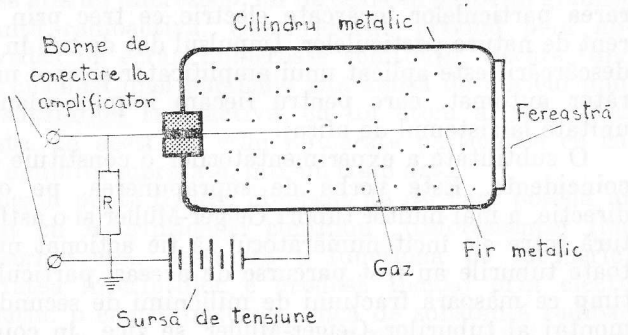


Fig. 11. Contor Geiger-Müller.

Un dispozitiv celebru, care servește la punerea în evidență a particulelor singulare este *contorul Geiger-Müller*. El este constituit, în esență, dintr-un tub metalic, umplut cu gaz, închis la capete cu două capace izolante, prin care trece un fir metalic de-a lungul axei tubului. Tubul și firul, care formează cei doi electrozi sînt în legătură cu un generator electric astfel ca între ei să fie creată o diferență de potențial ridicată (1 000—2 000 V). Tensiunea este astfel aleasă încît între electrozi să nu se producă o descărcare electrică, dar

foarte aproape de punctul disruptiv. În cazul că în contor intră o particulă încărcată electric, componenții perechilor ion-electron pe care le formează în drumul său vor fi puternic atrași de electrozii încărcați electric. În mișcarea lor, ionii vor avea o energie atît de mare încît vor ioniza, la rîndul lor, alți atomi întîlniți în calea lor; noii ioni vor produce aceleași efecte, formîndu-se, în final, o avalanșă de ioni. Acum va apărea descărcarea electrică între cei doi electrozi și, pentru un moment, un curent de intensitate relativ ridicată. Ca o consecință, diferența de potențial dintre cei doi electrozi scade la o valoare care nu va mai fi suficientă pentru a se produce noi ionizări în gaz. Descărcarea încetează și contorul revine la starea inițială, gata să semnaleze noi treceri de particule încărcate electric.

Descărcarea electrică din tub este trecută printr-un amplificator, apoi este pusă în evidență cu ajutorul unui instrument analogic, cu scală. Deviația unui indicator pe scală arată gradul de ionizare produs în tubul de descărcare.

Dar tubul Geiger-Müller mai poate fi folosit și la numărarea particulelor încărcate electric ce trec prin el, indiferent de natura particulelor. Impulsul dat de tub în momentul descărcării este aplicat unui amplificator și apoi unui numărător automat, care pentru fiecare impuls adaugă cîte o unitate la sistemul de afișaj.

O subtilitate a experimentatorilor o constituie contoarele coincidente. Este vorba de suprapunerea, pe o anumită direcție, a mai multor tuburi Geiger-Müller și o astfel de legătură între ele încît numărătorul să fie acționat numai dacă toate tuburile au fost parcurse de aceeași particulă (într-un timp ce măsoară fracțiuni de milionimi de secundă!). Acest montaj al tuburilor Geiger-Müller se zice „în coincidență"; particulele care parcurg un singur tub nu sînt semnalate de contor. Este ușor de imaginat că pot fi concepute sisteme de contoare care să înregistreze doar particulele care provin de pe o direcție bine determinată.

Acestea au fost cîteva dispozitive de detecție, bazate pe faptul că o particulă încărcată electric, trecînd printr-un gaz, ionizează atomii pe care îi întîlnește în drumul său. Alte metode însă se bazează pe faptul că particula încărcată electric excită atomii pe care îi întîlnește în drumul său, adică face ca electronii de pe o orbită a atomului să atingă un nivel energetic mai mare. După cîteva fracțiuni de secundă,

acești electroni se vor reîntoarce la nivelul energetic inițial, emițînd energia absorbită sub formă de lumină. Fenomenul a dus la realizarea a două metode de detectare: contorii cu scintilație și contorii Cerenkov.

Cele două tipuri de contoare amplifică și înregistrează lumina (slabă) produsă de particulele încărcate electric la trecerea lor prin substanță, apărută în urma excitării stărilor atomice și moleculare.

Contorul cu scintilație folosește o metodă cunoscută încă de pe timpul cînd E. Rutherford și soții Curie își desfășurau clasicele lor experiențe. El a fost inventat de W. Crookes, încă din anul 1903. Metoda scintilației a căzut apoi în desuetudine, fiind depășită de modernele metode electrice descrise mai sus. Dar, în ultima vreme a avut o revenire spectaculoasă în laboratoarele cercetătorilor, bineînțeles într-o formulă nouă.

Dispozitivul folosit în trecut, numit spintariscop, era compus dintr-un mic ecran de sticlă, acoperit cu un strat subțire de sulfură de zinc (substanță fluorescentă). De o parte a ecranului se afla un microscop, iar de cealaltă parte un grăunte de substanță radioactivă. Observatorul, privind prin microscop, vedea pe ecran numeroase scintilații, fiecare fiind rezultatul ciocnirii unei particule alfa emisă de nucleul unui atom al substanței radioactive, cu un atom al substanței fluorescente. În acest fel erau numărate particulele ce cădeau pe o anumită suprafață, într-un timp dat.

Fenomenul poate fi ușor observat de cei care posedă un instrument cu inscripționări continuu „fosforescente" (busolă, ceasornic etc., destinate a funcționa pe întuneric). Luminozitatea inscripțiilor e produsă tocmai prin efectul de scintilație: o cantitate foarte mică de substanță radioactivă este amestecată cu o substanță fluorescentă care este activată de bombardamentul continuu al particulelor alfa, emițînd lumină. Dacă se privește o fărîmă din substanța luminoasă de pe inscripțiile instrumentului la un microscop într-o cameră întunecoasă, se pot observa, individualizat, numeroasele scintilații care, în ansamblu, dau impresia unei luminozități constante.

Vechea metodă a scintilațiilor a fost perfecționată încît să poată pune în evidență, de asemenea, particulele beta și radiațiile gama. Contorul cu scintilație se bazează pe fluorescența cristalelor unor ioduri (de sodiu, antracen, trifenil

etc.), numite scintilatori, sub influența ciocnirilor cu particule alfa, beta sau radiații gama. Lumina emisă de scintilatori este în domeniul ultraviolet; fiind transparenți, scintilatorii pot fi folosiți în straturi relativ groase. Pentru observare și numărare se folosesc celule fotoelectrice speciale numite fotomultiplicatori, care permit obținerea unui impuls electric puternic, capabil să fie înregistrat de aparatură, de obicei, automată.

Metoda contorului cu scintilație prezintă avantajul de a fi foarte rapidă, permițînd astfel observarea unor fenomene care se petrec în intervale de timp extrem de scurte, de ordinul miliardimilor de secundă.

Contoarele Cerenkov se folosesc atunci cînd se studiază particulele încărcate electric, care traversează un mediu material transparent, avînd o viteză mai mare decît viteza de propagare a luminii în mediul respectiv. În acest caz apare efectul Cerenkov, descoperit de fizicianul sovietic P.A. Cerenkov, în 1934.

Cum se explică acest efect? Dacă se consideră v viteza luminii în mediul material cu indice de refracție n, atunci viteza luminii în mediul respectiv va fi egală cu c/n. Dacă viteza u a particulei în mediul cu indicele de refracție n este mai mare decît c/n, se manifestă efectul Cerenkov care, în domeniul opticii este analog undei balistice (unda de șoc) care se formează în aer, cînd un proiectil sau un avion se mișcă cu o viteză mai mare decît viteza sunetului. (Unda de șoc balistică este însoțită de o variație locală bruscă a presiunii, temperaturii și greutății specifice a mediului, manifestată acustic, pentru un observator, printr-o bubuitură puternică; este și cazul exploziei unui proiectil.) Ca urmare a suprapunerii în fază a undelor luminoase emise de excitarea atomilor întîlniți, se observă o iradiație ce indică direcția urmată de particulă. Dacă viteza particulei este mai mică decît valoarea c/n, iradierea este neglijabilă.

Pentru un mediu material dat, efectul Cerenkov nu depinde de masa particulei, ci doar de viteza sa și de sarcina sa electrică. În plus, față de fenomenul de scintilație, nu depinde de compoziția chimică și de structura moleculară a mediului traversat, ci doar de indicele său de refracție.

Fizicienii au profitat de acest elegant fenomen, construind contoarele Cerenkov, intrate în prezent în uzul curent al

laboratoarelor. Ele au o extrem de mare viteză de răspuns și pot da indicații precise care permit determinarea vitezei unei particule, direcția traiectoriei precum și sensul în care o parcurge. Evident, o fotografie a traiectoriei permite cunoașterea cantitativă a unor parametri ai particulei.

Dar așa cum deseori se întîmplă în cercul cercetătorilor, detectoarele menționate mai sus s-au dovedit insuficiente în cazul unor particule grele, cu energii foarte mari. În aceste cazuri, mediul material prin care treceau particulele (la volumul permis de instalație) nu puteau asigura frînarea acestora pînă la nivelul obținerii unor ionizări potrivite studiului. De pildă, drumul străbătut de o particulă în gaze, pînă cînd își pierde energia prin ionizare, este relativ lung, iar modificările parametrilor gazului (presiuni mari și temperaturi foarte scăzute de lichefiere) nu au reușit să amelioreze situația.

Cercetătorii au făcut apel la substanțele solide cristaline, dar fără rezultate acceptabile. Receptivi la noile descoperiri în domeniul fizicii solidului, atenția le-a fost atrasă de spectaculoasele succese ale fizicii semiconductorilor; în special s-au îndreptat spre germaniu și siliciu.

Semiconductorii sînt substanțe a căror conductivitate electrică este cuprinsă între cea a dielectricilor (izolatoare, în care nu există sarcini electrice libere) și cea a conductorilor (de exemplu metalele, în care există electroni liberi). Dacă un semiconductor este impurificat cu fosfor (impuritate donoare), se obține așa-numitul semiconductor cu conducție de tip n, în care electronii sînt purtători de sarcină majoritari. Dacă impurificarea se face cu bor (impuritate acceptoare), se obține un semiconductor de tip p, în care purtătorii de sarcină electrică sînt golurile pozitive (formate prin punerea în libertate, pentru alte legături, a electronilor din atomii cristalului).

Detectorul cu semiconductori folosește așa-numita joncțiune p-n, adică zona ce se realizează la contactul între doi semiconductori, unul cu conductivitate p, iar celălalt cu conductivitate n. Anume, se polarizează invers cele două zone, de la o sursă electrică exterioară (adică zona n se leagă la polul pozitiv al sursei, iar zona p la polul negativ). În felul acesta, joncțiunea se va prezenta ca o regiune de sarcină spațială (de trecere) suficient de groasă pentru a

permite identificarea particulelor grele, de energii mari, care trec prin zonă.

De fapt, ce se petrece în „zonă"? Atunci cînd o particulă încărcată pătrunde în semiconductor, are loc un fenomen asemănător ionizării: se produc perechi electron-gol. Aceste sarcini sînt colectate simultan cu ajutorul cîmpului electric aplicat joncțiunii. Semnalul ce apare este proporțional cu numărul de sarcini libere generate și cu energia particulei incidente.

Dar și detectoarele cu semiconductori au inconvenientul lor: pentru a funcționa cer o temperatură foarte scăzută (deci folosirea azotului lichid pentru răcire), iar altele funcționează numai în vid. Evident, complicații tehnice care trebuie rezolvate de tehnicieni, atunci cînd specificul experimentului reclamă acest tip de detectoare.

Toate aceste dispozitive, care sînt reunite sub numele generic de contoare, sînt folosite pentru localizarea cu mare precizie a momentului trecerii unei particule subatomice. Ele permit însă o nuanțare și anume: după nivelul energiei particulelor ce trebuie puse în evidență, cît și a altor categorii de date ce trebuie deduse se folosește o metodă sau alta, fiecare din ele devenind zi de zi mai perfecționată și mai rafinată.

Semnăturile particulelor elementare

În completarea contoarelor au fost puse la dispoziția cercetătorilor și o altă categorie de dispozitive, care permit observarea traiectoriei parcurse de o particulă la trecerea acesteia prin zona de observație. Cu ajutorul acestor detectoare, numite și înregistratoare de urme, se poate vedea poziția, în spațiu chiar, a unui singur ion produs de particulă, dar nu poate fi determinat momentul în care particula a trecut prin zonă.

Dispozitivul cel mai reprezentativ pentru determinarea traiectoriilor particulelor subatomice este *camera Wilson*, după numele inventatorului, C.T.R. Wilson, care a fost supranumită „o fereastră deschisă spre lumea atomică" și „cel mai genial și minunat instrument din istoria științei". Funcționarea camerei Wilson se bazează pe proprietățile ceții, de aceea mai este numită *camera cu ceață*.

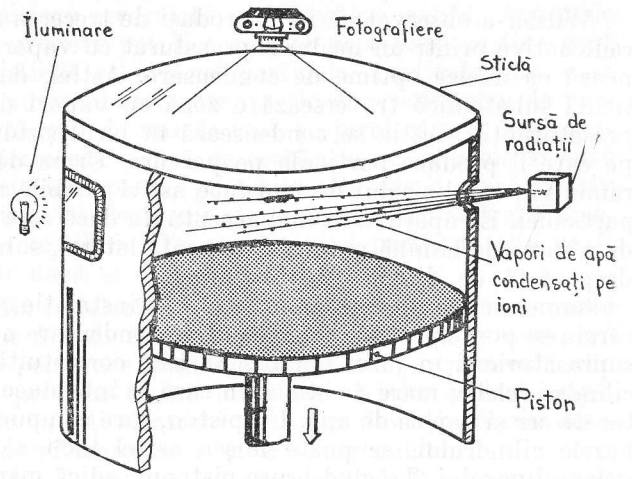


Fig. 12. Camera cu ceață.

Ce este ceața și cum se produce? Ceața este constituită dintr-un număr extrem de mare de picături fine de apă, în centrul fiecăreia fiind un mic fragment de praf atmosferic sau ioni atmosferici. Umiditatea atmosferică, în condiții normale de presiune și temperatură, nu poate depăși o anumită valoare, la care aerul este saturat cu vapori de apă.

Valoarea umidității atmosferice se modifică o dată cu temperatura; mai precis, este cu atît mai mică cu cît este mai scăzută temperatura. De aceea, atunci cînd aerul saturat cu vapori se răcește, o parte din el se condensează și se transformă în apă. Se poate însă întîmpla ca aerul saturat cu vapori de apă să se răcească brusc, cum ar fi de pildă în natură, la căderea serii; în acest caz vaporii nu au timp să se condenseze, aerul rămînînd astfel suprasaturat cu vapori. Însă vaporii suprasaturanți sînt instabili și orice impuritate ar pătrunde în mediul respectiv ar produce fenomenul de condensare. În felul acesta, praful atmosferic acționează ca centre de condensare; în jurul fiecărui firișor de praf se formează o picătură fină de apă, atît de mică și de ușoară încît poate rămîne suspendată în aer. Așa se explică ,pe de o parte, cețurile dese care acoperă luni de zile marile orașe industrializate: numeroasele coșuri ale fabricilor aruncă continuu în atmosferă mici impurități care contribuie la îndesirea prafului atmosferic în jurul căruia se condensează umiditatea, de îndată ce, în anumite condiții climatice, aerul devine suprasaturat cu vapori.

Wilson a observat că ionii produși de trecerea radiațiilor radioactive printr-un mediu suprasaturat cu vapori, funcționează ca nuclee optime de condensare. Astfel, dacă o particulă subatomică traversează o zonă cu vapori de apă suprasaturanți, aceștia se condensează în jurul șirului de ioni pe care îl produce particula pe parcurs. Urma de ceață ce rămîne în locul șirului de ioni face astfel vizibilă traiectoria particulei. Ea apare mult mai accentuată dacă este iluminată de o sursă de lumină puternică, așezată lateral, sub un unghi drept față de direcția de observare.

Camera cu ceață este, în principiu, o instalație cu ajutorul căreia se poate produce fenomenul de condensare a vaporilor suprasaturanți în jurul ionilor. Ea este constituită dintr-un cilindru relativ mare de sticlă, în care se introduce un amestec de aer și vapori de apă. Un piston, care compune una din bazele cilindrului, se poate mișca astfel încît să modifice volumul gazului. Trăgînd brusc pistonul, adică mărind brusc volumul gazului (acțiune numită detentă), amestecul de aer și vapori de apă se destinde, răcindu-se. Dacă vaporii de apă erau inițial saturanți, prin destindere ei devin suprasaturanți, astfel încît trecerea unei particule subatomice încărcate electric lasă în urma sa o dîră fină de ceață.

Urmele de ceață pot fi fotografiate sau filmate în momentul detentei și, fiind foarte luminoase, lasă pe pelicula negativă o linie neagră. Instalațiile moderne au prevăzute sisteme atomate de fotografiere sau filmare care, prin sincronizarea detentei cu fotografierea, asigură o mare acuratețe de înregistrare. În camerele cu ceață modernizate, pistonul care produce detenta a fost înlocuit cu membrane elastice. Această modificare, pe lîngă faptul că a redus simțitor gabaritul instalației, îi asigură o mai mare rapiditate în funcționare; iar vaporii sînt formați dintr-un amestec de apă și alcool.

De obicei camerele cu ceață sînt cuplate cu contori de particule care, sesizînd trecerea unei particule, le declanșează funcționarea. În felul acesta înregistrările de particule se fac cu mare economie, acționîndu-se doar în momentul oportun.

Cercetătorii obișnuiți cu studiul urmelor obținute în camera cu ceață pot recunoaște la prima vedere despre ce fel de particulă este vorba. Urma unei particule alfa este mai groasă, în general rectilinie și relativ scurtă; aceea a unui electron este mult mai subțire, mai lungă și prezintă o traiectorie rectilinie sau neregulată, după viteza avută. Aspectele diferite ale urmelor pot fi explicate ușor dacă se ține cont de caracteristicile celor două particule. Particula alfa, care are o mare putere de ionizare, pe fiecare centimetru de parcurs formează zeci de mii de ioni, în jurul cărora, prin condensare se formează o dîră de ceață; de aceea urma sa este groasă. Pe de altă parte, particula alfa are o masă relativ mare, ciocnirile cu electronii atomilor nu o deviază și traiectoria sa este rectilinie. Traiectoria unei particule alfa va fi diferită doar dacă se ciocnește cu un nucleu.

În schimb, un electron, avînd aceeași energie, care poate produce doar 100 de ioni pe fiecare centimetru parcurs, are o putere de penetrare mult mai mare decît o particulă alfa și de aceea produce o dîră mult mai subțire și mai lungă, iar ciocnirile cu alți electroni îi produc deviații relativ dese, de aceea uneori traiectoria sa este neregulată.

Cu ajutorul camerei cu ceață, cercetătorii au avut satisfacția să poată observa ciocnirea particulelor alfa cu nucleul unui atom. Urmărind un mare număr de înregistrări, ei au putut „vedea" cum o particulă alfa, după ce a lovit un nucleu, a fost deviată de pe traiectoria sa, iar nucleul lovit a fost pus în mișcare pe o direcție care face un anume unghi cu direcția particulei după ciocnire. Acest eveniment se vede sub forma unei „furci", coarnele furcii reprezentînd cele două direcții după ciocnire.

În general, cînd se ciocnesc două particule, direcțiile lor de mișcare după ciocnire formează un unghi care este ascuțit dacă particula inițială are masa mai mare, obtuz în cazul contrar și unghi drept în caz că masele celor două particule sînt egale.

Desigur, la fel se petrec lucrurile și atunci cînd o particulă alfa se ciocnește cu un nucleu. Dacă, de pildă, nucleul întîlnit este cel al unui atom de hidrogen (de patru ori mai ușor decît particula alfa), atunci cele două ramuri ale „furcii" formează între ele un unghi ascuțit. După grosimea celor două ramuri se poate ușor deduce care este cea a particulei alfa: cea mai groasă, întrucît avînd masa mai mare are și puterea de ionizare mai mare. Dacă însă o particulă alfa întîlnește un nucleu de heliu, cele două particule fiind egale (au aceeași masă), urmele lor după ciocnire formează un unghi drept. În fine, dacă particula alfa întîlnește în drumul

ei un nucleu de oxigen (de patru ori mai greu), cele două direcții ale „furcii" formează un unghi obtuz.

Dar evenimentul cel mai spectaculos îl reprezintă „vederea" în camera cu ceață a unei „furci" fără „coadă" sau a unor dîre groase singulare. Aceste urme pot fi explicate doar admițînd că în zonă a intrat o particulă fără sarcină electrică, adică fără a avea puterea de a ioniza. În aceste situații, urmele arată că, prin ciocnire, particula neionizantă a pus în mișcare un nucleu, care apoi a provocat formarea dîrei de ceață singulare, ori a „spart" un nucleu (după cum se va vedea în continuare) iar urmele sînt „coarnele furcii" fără „coadă". (O astfel de particulă este neutronul.)

Dar camerele cu ceață pot mai mult. Ele pot pune în evidență și electronii eliberați prin interacția fotonilor (adică a radiațiilor electromagnetice de frecvență ridicată) cu atomii. Electronii eliberați de fotoni X sau gama, fie prin mecanismul fotoelectric, fie prin efect Compton, pot avea energie suficientă pentru a produce o ionizare a gazului în care se află. Urmele lăsate de acești electroni sînt dîre subțiri, care pornesc de undeva din gaz, indicînd locul unde a avut loc ciocnirea fotonului cu atomul, adică unde a avut loc eliberarea electronului.

O asociere fericită a camerei cu ceață, cu un cîmp magnetic foarte puternic permite deflectarea particulelor încărcate electric care trec prin zona de observare, astfel încît traiectoriile acestora descriu curbe mai mult sau mai puțin accentuate. În aceste situații pot fi recunoscute nu numai felul sarcinilor particulelor (cele pozitive sînt curbate în sens invers celor negative), ci se poate deduce și viteza fiecărei particule (mai precis, impulsul mv), deoarece, în general, o particulă suferă o deflexie cu atît mai mare cu cît viteza sa este mai mică.

Una dintre cele mai vechi metode de a pune în evidență evenimente ale lumii microcosmosului a fost sugerată de experiența lui Becquerel, din anul 1896, ale cărui plăci fotografice au fost impresionate de radiațiile emise de sărurile de uraniu. Această tehnică, numită a plăcilor (emulsiilor) nucleare, a început să fie folosită abia după anul 1940, ajungînd ca în prezent să fie intens folosită mai ales pentru punerea în evidență a particulelor ionizante singulare și studierea fenomenelor pe care acestea le produc. *Emulsiile nucleare* sînt foarte asemănătoare emulsiilor fotografice obișnuite,

fiind compuse dintr-un suport transparent (sticlă sau material plastic) și un strat fotosensibil din halogenură de argint. Emulsiile nucleare au stratul sensibil mai gros decît cele fotografice.

Principiul de lucru este deosebit de simplu. Atunci cînd o particulă ionizantă traversează emulsia, trecînd prin apropierea unei granule de halogenură de argint o ionizează. Emulsia nucleară poate fi developată ca o placă fotografică obișnuită, iar urma granulei ionizate se va vedea ca o granulă neagră (argint metalic). Desigur, urma particulei va fi o înșiruire de astfel de granule de argint metalic.

Văzînd o înregistrare pe emulsie nucleară, este ușor de găsit o asemănare între urmele de ceață din camera Wilson și urmele de granule de argint din placa de emulsie. Deosebirea constă în natura urmelor lăsate; în timp ce în camera cu ceață, în jurul ionilor se formează mici picături de apă care mărindu-se treptat devin vizibile, într-o emulsie nucleară, în jurul ionilor negativi formați prin trecerea particulei încărcate electric se formează mici depozite de atomi de argint metalic care se pun în evidență prin procesul de developare, sub forma unor urme vizibile prin microscop.

Pentru ca metoda emulsiei nucleare să fie eficientă este necesar să fie folosite emulsii cu granulații extrem de fine, iar procesul de developare și fixare să fie făcut cu o tehnică specială, în așa fel încît să nu fie deformată gelatina emulsiei și totodată să fie eliminate granulele impresionate prin efecte străine trecerii particulei. Mai mult chiar, au fost realizate emulsii sensibile pentru anumite tipuri de particule.

Metoda de cercetare a emulsiilor developate este foarte delicată, folosindu-se microscoape prevăzute cu dispozitive de numărare a granulelor pe fiecare traiectorie, de măsurare a lungimilor traiectoriilor, a unghiurilor etc. Cu cît particula a pierdut mai multă energie prin traversarea emulsiei, cu atît urma apare mai neagră. Astfel că numărul de granule pe unitatea de lungime, cît și lungimea traiectoriei dau indicații asupra naturii particulei.

Deși metoda emulsiilor nucleare prezintă avantaje deosebite, de a fi simplă de folosit, fără a face apel la nici un fel de surse electrice sau mecanice, are marele dezavantaj că este laborioasă. În primul rînd explorarea unei plăci developate cere un timp îndelungat de lucru sub microscop.

Apoi, placa expusă trecerii particulei trebuie developată cu maximă urgență, deoarece cu trecerea timpului urmele lăsate au tendința să dispară.

Printre avantajele metodei se numără și faptul că emulsiile developate păstrează informația timp îndelungat. Pe de altă parte, pentru studierea particulelor cu energii înalte, care trec ușor prin grosimi mari de emulsii, se folosesc pachete cu plăci (uneori de ordinul sutelor!) și astfel se poate urmări întregul drum parcurs, studiind în laborator, pe îndelete, plăcile developate.

În ultimii ani însă, calculatoarele electronice au adus și în domeniul metodei emulsiilor nucleare tehnici spectaculoase. Au fost puse la punct metode automate de triere a înregistrărilor, ceea ce a dus la posibilitatea luării în considerare a sute de mii de emulsii într-un timp relativ scurt.

Perfecționări: camera cu bule și simulatorul electronic

Dar, cu toate că atît camera cu ceață, cît și metoda emulsiilor nucleare pot aduce informații numeroase asupra particulelor elementare, fizicienii nu erau întrutotul mulțumiți: camera de ceață funcționează doar pe intervale scurte de timp și nu permite să se măsoare nici densitatea urmelor, nici lungimea lor; metoda emulsiilor nucleare cere un timp îndelungat de explorare sub microscop, nu dau informații asupra timpului în care înregistrarea a avut loc, iar din cauza densității mari a emulsiei, deci a numeroaselor ciocniri ale particulei cu atomii emulsiei, parcursul particulei este atît de deformat încît aplicarea unui cîmp magnetic nu duce la rezultate măsurabile.

O ameliorare a „crizei" a adus-o fizicianul Glaser, în 1952, care și-a propus o combinare a avantajelor și dezavantajelor camerei cu ceață. S-a gîndit la un mediu de compromis, care să fie suficient de dens pentru a prezenta calitățile emulsiei (să permită ciocniri dense ale particulei ionizante) și suficient de puțin dens pentru ca, asemănător camerei cu ceață, să poată permite influența unui cîmp magnetic și ca fiecare traiectorie să aibă dimensiuni potrivite. De asemenea, mediul să-și poată relua rapid calitățile după efectuarea primei fotografii.

Pentru a-și realiza ideea, Glaser a folosit ca mediu un lichid lipsit de orice impuritate (hidrogen lichid, propan etc.) și o proprietate a acestor lichide, de altfel cunoscută de multă lume: dacă dintr-un lichid se elimină toate impuritățile, atunci el poate fi încălzit la o temperatură mai mare decît temperatura sa de fierbere, fără a fierbe! Dar dacă în lichid apare o cît de mică impuritate (de pildă, o fărîmă de sticlă), el începe imediat să fiarbă cu violență. Fenomenul prin care un lichid se află într-un astfel de echilibru instabil se numește *supraîncălzire*.

Glaser s-a întrebat dacă nu cumva această mică impuritate ar putea fi o particulă subatomică în trecere prin lichid, și trecerea sa ar putea provoca fierberea. Întrebarea sa a primit un răspuns afirmativ prin experiență: atunci cînd, într-un anume interval de valori ale temperaturii, o particulă ionizantă care trece printr-un lichid supraîncălzit, pe parcursul său provoacă formarea unor bule microscopice care declanșează fierberea. Acest fenomen stă la baza unei instalații de înregistrare a urmelor particulelor subatomice, numită *camera cu bule*.

Camera cu bule este, în esență, o incintă umplută, de obicei, cu hidrogen lichid. Se folosește hidrogenul, deoarece nucleele sale sînt protoni, adică particule „fundamentale" și interacțiile cu protonii prezintă un interes deosebit. Hidrogenul lichid este supus unei scăderi bruște de presiune pînă la o valoare la care lichidul se află în stare de supraîncălzire. Dacă prin lichidul supraîncălzit trece o particulă ionizantă, în jurul ionilor formați de aceasta se produce vaporizarea lichidului și astfel urma devine vizibilă.

Urmele pot fi subțiri sau groase, după natura particulelor incidente, iar densitatea urmelor, care este un indicator al energiei (deci al puterii de ionizare) particulei, este mai bună decît cea obținută în camera cu ceață. Dar diferența enormă dintre o cameră cu bule și camera cu ceață constă în numărul mare de evenimente rare observabile cu prima; calitate care explică faptul că o cameră cu bule de 15 cm echivalează cu camera cu ceață lungă de... 42 m!

Camera cu bule asigură o mare rapiditate în reluarea ciclului de observații, dar camera cu ceață este mult superioară atunci cînd se urmărește măsurarea cu mare precizie a unui impuls.

Un alt aparat care se folosește pentru înregistrarea fotografică a urmelor particulelor elementare ionizante de energii mari este *camera cu scîntei*. Este compusă dintr-o incintă umplută cu gaz inert, în care sînt plasate o serie de plăci metalice subțiri, între care se aplică o mare diferență de potențial. O particulă care trece prin incintă, prin ionizarea gazului face să apară o scînteie între plăci, care poate fi fotografiată.

Dezavantajul camerei cu ceață (și a camerei cu bule), de a funcționa cu intermitență, a fost depășit prin inventarea, în 1938, a *camerei cu difuzie*. Într-un astfel de aparat, pentru punerea în evidență a urmelor particulelor, asemănător camerei cu ceață, este folosit un mediu de vapori suprasaturanți. Dar de data aceasta suprasaturarea nu se face prin detentă, ci se datorește difuziei unor vapori ușor condensabili la temperatura camerei (alcool), printr-un gaz necondensabil, aflat la temperatură scăzută (hidrogen).

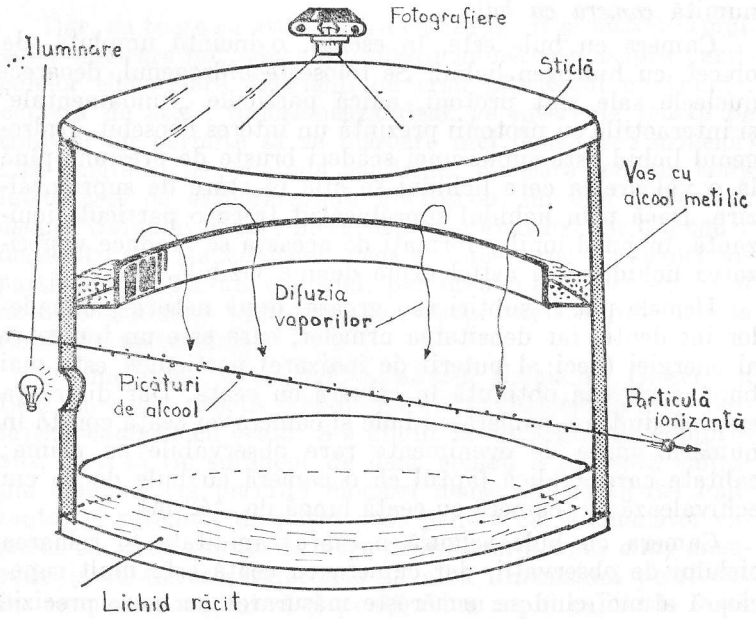


Fig. 13. Camera cu difuzie.

În incita în care se realizează un astfel de amestec, în zona inferioară se formează un mediu cu regim continuu de vapori suprasaturanți. Evident, orice particulă care trece prin zonă lasă urme sub forma unor dîre de ceață, ce pot fi fotografiate folosind o iluminare laterală.

Camera cu difuzie prezintă avantajul că are o funcționare continuă, și a primit o largă întrebuințare în laboratoare.

Explozia computerelor nu putea să nu afecteze și laboratoarele de cercetări a lumii microcosmosului. În afară de posibilitățile „mărunte" pe care le oferă asistența computerelor la numărare, triere, automatizare etc., ele au dat laboratoarelor o metodă de cercetare cu cea mai mare putere de pătrundere în secretele particulelor subatomice: simulatorul. Computerul simulator poate analiza coliziuni ipotetice de particule, la energii care în prezent sînt de domeniul visurilor: 40 teraelectron-volți! Computerului i se furnizează datele cunoscute ale particulelor dorite și se „provoacă" interacția. Pe display-ul computerului apar traiectoriile evenimentului ipotetic, în care pot fi identificate particulele rezultante.

În cele de mai sus au fost trecute în revistă o serie de instrumente de lucru pe care le au la dispoziție laboratoarele de cercetare. Desigur, toate prezintă grade mari de automatizare și sînt folosite diferențiat, după natura evenimentelor urmărite.

Capitolul 6

NUCLEUL

Din nou despre măsurători

Descoperirea radioactivității a accentuat ideea că nucleul atomului are o structură complexă. Astfel că din nou au apărut întrebări solicitînd răspunderi care să justifice fenomenele radioactive: ce fel de particule constituie nucleul atomic, acest corpuscul cu raza de ordinul a 10^{-15}m ce reprezintă aproape toată masa atomică și care stă în centrul atomului, protejat de „cortegiul" electronilor? Ce fel de forțe leagă între ele particulele constituente?

Iată cele două probleme cu care s-a confruntat studiul nucleului atomic, studiu care constituie o parte a fizicii numită fizica nucleară.

Din nou începe să devină importantă masa atomică. Acum se știa de existența izotopilor. De asemenea, se știa că în timp ce din punct de vedere chimic existau 92 elemente distincte, în realitate, dacă se ține seama de masele atomice, speciile atomilor existenți în natură sînt mult mai numeroase, ajungînd la circa 240. Unii dintre acești atomi, deși aveau același număr de electroni periferici și deci avînd aceleași avînd proprietăți chimice, se deosebeau prin valorile diferite ale maselor lor, adică erau izotopi.

De pildă, există în natură un element ai cărui atomi sînt alcătuiți dintr-un nucleu central, avînd o masă diferită de cea a protonului și cu un singur electron periferic. Acesta este izotopul hidrogenului și a primit numele de deuteriu. Nucleul său a fost numit deutron și, după cum se va vedea în continuare, este destinat să joace un rol important în aplicarea în practică a descoperirilor fizicii atomice.

Măsurarea maselor atomilor a fost problema care a cerut de la început un înalt grad de finețe din partea cercetătorilor. Cel care a pus la dispoziția fizicienilor metoda de lucru a fost J.J. Thomson, prin lucrările sale de determinare a raportului dintre sarcina electrică și masa electronului, e/m. Metoda constă în observarea deflexiei produse de acțiunea combinată

a unui cîmp magnetic și a unui cîmp electric asupra traiectoriei unui fascicul de ioni pozitivi ai elementului în cauză. Pe baza acestei metode, fizicianul Aston a construit spectrograful de masă, un instrument de lucru care a contribuit într-o foarte mare măsură la extinderea cunoștințelor asupra atomului (vezi fig. 9 p. 73).

Principiul de lucru al spectografului de masă Aston are în vedere faptul că un fascicul de ioni ai unui anume element, avînd toți aceeași viteză, atunci cînd se află într-un cîmp electric sau magnetic se comportă ca un curent electric, suferind o deviație a traiectoriei într-o măsură mai mare sau mai mică, în funcție de masa ionilor ce compun fasciculul. Dacă ionii ar avea toți aceeași masă, ei ar fi deviați în aceeași măsură. Dar dacă ionii reprezintă un amestec, de pildă de doi izotopi ai elementului respectiv, atunci din cauza maselor diferite ei vor fi deviați diferit de cîmpurile electric și magnetic, aceasta concretizîndu-se prin formarea a două fascicule diferite de ioni. Așezînd o placă fotografică într-un loc potrivit, se pot obține urmele celor două fascicule de ioni. După pozițiile înregistrate ale celor două urme se poate determina masa izotopilor componenți ai elementului studiat.

Cele două cîmpuri, electric și magnetic, nu acționează simultan; mai întîi ionii trec printr-un cîmp electric, apoi prin unul magnetic. Sensurile și intensitățile acestor cîmpuri sînt astfel potrivite încît toți ionii fasciculului pentru care raportul dintre sarcina electrică și masă este același, să fie concentrați într-un punct, oricare le-ar fi viteza.

Spectograful de masă a confirmat rezultatele teoretice ale fizicienilor, că toate elementele reprezintă un amestec de izotopi; atomii fiecăruia dintre aceștia au nuclee a căror masă, potrivit acurateței instalației, s-au dovedit a fi un multiplu întreg al masei protonului, adică al nucleului de hidrogen. Acest *număr întreg* va primi numele de *număr de masă (A)*.

Imaginea elementelor chimice cunoscute a primit astfel o nouă înfățișare. De pildă, fierul este un amestec de trei izotopi, avînd numerele de masă 54, 56 și 57, ceea ce vrea să spună că nucleele atomice ale acestora au masa de 54 de ori mai mare decît a unui proton, respectiv de 56 și 57 de ori.

Apariția izotopilor a adus însă o serie de aspecte inedite în lumea fizicienilor și a chimiștilor. De pildă, doi izotopi ai

fierului, avînd numerele de masă 56 și 57, diferă unul de altul în aceeași manieră cu care diferă de elementul precedent (manganul), cu numărul de masă 54. Pentru fizica nucleară, faptul că cei doi izotopi ai fierului, cu numerele de masă 56 și 57 au aceleași proprietăți chimice,adică amîndoi sînt „fier", este o chestiune secundară, care depinde de numărul de electroni orbitali; pentru că cei doi izotopi ai fierului au același număr de electroni orbitali.

Aici apare o diferență între punctele de vedere ale unui chimist și ale unui fizician. Chimistul nu face deosebire între izotopii unui element chimic avînd toți același nume, pe cînd pentru fizica nucleară fiecare izotop reprezintă o entitate diferită, fără să ia în seamă norul electronic care îl însoțește.

Astfel, fizica nucleară a adoptat un sistem de notare prin care să scoată în evidență particularitățile nucleului fiecărui izotop. În primul rînd sînt folosite aceleași litere de simbol din „Tabelul" periodic, prin care se indică natura elementului despre care este vorba. Apoi, în fața simbolului se mai pun două numere. Unul, indicele superior, arată numărul de masă, iar celălalt, indicele inferior, arată numărul atomic, adică numărul de unități de sarcini electrice pozitive din nucleu (sarcini care sînt neutralizate de un același număr de electroni orbitali). De pildă, $^{235}_{92}U$ indică nucleul unui izotop al uraniului (numărul atomic 92), care are numărul de masă 235.

O dată cu perfecționarea spectografiei de masă, mărindu-se puterea de rezoluție, a fost însă constatată o nepotrivire față de concluzia lui Aston, că masele izotopilor reprezintă multipli întregi ai masei protonului. Măsurătorile precise au arătat că acest lucru nu este tocmai exact; mai precis, dacă Aston a găsit masele izotopilor clorului ca fiind 35 și 37, noile măsurători le-au găsit ca fiind 34,983 și respectiv 36,98. Chiar dacă aceste valori au decepționat — prea era frumoasă ordinea —, totuși fizicienii le-au acceptat ca întregi, prin rotunjire.

Este interesant de remarcat felul cum s-a modificat pe parcurs scara maselor atomice. La început, cînd chimiștii au alcătuit tabelul maselor atomice, au convenit să utilizeze o scală în care oxigenului întîlnit în natură i s-a dat (prin definiție) masa atomică relativă 16. În funcție de această

convenție au fost determinate masele tuturor elementelor cunoscute, aceste valori constituind *scara chimică*. În scara chimică, aproape toate masele atomice aveau ca valori numere întregi (cu excepția clorului care avea valoarea 35,5).

După descoperirea și identificarea izotopilor, fizicienii au propus o nouă scară a maselor atomice, în care se ia ca bază masa relativă a izotopului 16 al oxigenului.

Întrucît nici această scară nu corespundea exigențelor fizicii nucleare, recent s-a adoptat o nouă convenție pentru masa atomică relativă, bazată pe atomul (nu nucleul!) izotopului 12 al carbonului. Atomului acestui izotop de carbon i s-a atribuit astfel o masă de exact 12 *unități atomice de masă* (u), adică 12 u. Această convenție stă la baza actualei scări de mase atomice, în care 1 u=10^{-27} kg.

Descoperirea izotopilor, în anul 1913, a adus în actualitate o idee care a fost lansată ca un secol mai devreme. În 1815, W. Prout a publicat, pe neașteptate, un articol anonim, prin care susținea că toate elementele sînt compuse din atomi de hidrogen. El se baza pe argumentele timpului său, care au stabilit că masele atomice ale tuturor elementelor erau multipli exacți ai celei de hidrogen. Ipoteza lui Prout a fost însă rapid discreditată prin măsurătorile precise datorate perfecționării instrumentelor: nu a fost găsit nici un element a cărui masă atomică să fie un multiplu întreg a celei de hidrogen.

Apariția pe terenul științei a izotopilor și a noilor concepții asupra atomului au dat o nouă formă ipotezei lui Prout, lansată, probabil, printr-un raționament de suprafață, dar „nimerind" o direcție „cîștigătoare".

Visul alchimiștilor: transmutația elementelor

Fizicienii, intrigați de faptul că masele atomilor au valori ce reprezintă, practic, numere întregi, s-au întrebat: nu cumva nucleele atomice au în componența lor unul sau mai mulți constituenți comuni?

Răspunsul nu era ușor de dat, mai ales că pentru a-l afla nu se întrezărea decît o singură cale: spargerea unui atom! De fapt, natura, prin radioactivitate, nu face altceva decît „sparge" atomii anumitor elemente și oferă spectacolul transformării unui element în altul. Dar acest fenomen, de dezintegrare spontană, nu poate fi controlat în nici un fel. Nici

reacțiile chimice, nici descărcările electrice, nici temperatura nu pot să încetinească sau să accelereze desfășurarea fenomenului la nivelul nucleului, acești agenți operînd doar la nivelul electronilor orbitali.

Acum pot fi explicate ușor eșecurile alchimiștilor, în tentativele lor de a transforma metalele obișnuite în aur. Operația, care s-ar traduce prin modificarea nucleului, nu putea fi nicidecum realizată prin reacții chimice sau modificări de temperatură, care acționau doar asupra electronilor orbitali ai atomilor.

Deși se consideră că alchimiștii alergau după o himeră, unii cercetători ai acestei perioade au ajuns la concluzia că nu toți alchimiștii ar fi mers pe același drum. Unii ar fi folosit în experiențele lor substanțe radioactive ca agenți de lucru, ipoteză bazată pe faptul că documentele vremii vorbesc despre „răni grave" care îi afectau pe alchimiști, producîndu-le moartea. Potrivit epocii, îmbîcsită de misticism, îmbolnăvirea „păcătoșilor" era de origine „divină", ca pedeapsă că încercau să schimbe natura. Nu se știe la ce rezultate au ajuns acești alchimiști bănuiți de experiențe cu substanțe radioactive, dar acum se poate preciza ce efecte ar fi putut produce elementele radioactive la nivelul nucleelor atomice.

Pentru a ajunge la nucleul unui atom, pentru a-l descompune în părțile sale constituente, era necesar să fie găsit un mijloc prin care să poată fi străpuns învelișul de electroni. Fizicienilor le-a venit ideea să „bombardeze" nucleul atomic cu particule de mare energie, care să prezinte importanta proprietate de a nu fi deviate de sarcinile electronilor orbitali ai atomului; în plus, energia unui proiectil trebuia să fie suficient de mare încît să pătrundă în nucleu, iar acesta, în urma impactului, să fie descompus în fragmente.

Dar cum să fie măsurată energia particulelor radioactive? În acest sens, s-a convenit asupra unei unități numită electron-volt. Electron-voltul reprezintă energia pe care o poate primi un electron accelerat de o diferență de potențial de 1 volt. Are simbolul eV, dar întrucît este o valoare foarte mică, de obicei se folosesc multiplii săi, megaelectron-voltul (MeV) — de un milion de ori mai mare — și gigaelectron-voltul (GeV) — de un miliard de ori mai mare. În Sistemul Internațional de unități de măsură [SI], 1 eV = $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ J.

Întrucît particulele alfa emise de substanțele radioactive aveau energia de ordinul megaelectron-volților, ele se anunțau tocmai potrivite de a fi folosite ca proiectile pentru bombardarea nucleului atomic. Ideea s-a dovedit fertilă, astfel că timp de mai mulți ani fizicienii au folosit cu succes particulele alfa emise de nucleele substanțelor radioactive pentru a pătrunde în secretele nucleului atomic.

Experiența celebră de spargere a unui nucleu a fost făcută de Rutherford, în 1919, care a bombardat azotul cu particule alfa, sperînd că va reuși să lovească vreun nucleu pentru a-l sparge. Desigur, neexistînd nici o metodă de țintire a nucleelor, „proiectilele" au fost trimise la întîmplare. Multe s-au pierdut, dar totuși cîteva își atingeau ținta.

Aparatul folosit de Rutherford consista dintr-un recipient care putea fi umplut cu gaz. În unul din pereții recipientului era o deschizătură acoperită ermetic din interior cu o plăcuță de argint, în dreptul căreia, în exteriorul recipientului, era așezat un ecran mic de sticlă, acoperit cu sulfură de zinc (substanță fluorescentă). Sursa de particule alfa era o fărîmă de radiu, așezată pe un suport în interiorul recipientului. Particulele alfa emise de radiu nu puteau ajunge la ecranul fluorescent, deoarece erau absorbite de plăcuța de argint așezată în drumul lor.

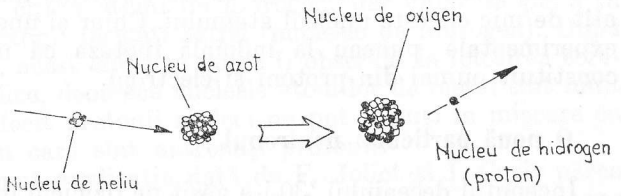


Fig. 14. Prima transmutație, a azotului în oxigen.

După umplerea recipientului cu azot, pe ecran puteau fi observate cîteva scintilații. Deci, din azot erau eliberate unele particule care aveau suficientă energie pentru a traversa plăcuța de argint și să producă scintilații pe ecranul fluorescent. Pentru a determina natura acestor particule, Rutherford le-a examinat într-un cîmp magnetic. Studiind traiectoriile pe care le descriau în urma devierii produse de

cîmpul magnetic, Rutherford a ajuns la concluzia că particulele sînt protoni, adică nuclee de hidrogen.

Chiar dacă experiența lui Rutherford mai are și alte aspecte, care vor fi prezentate în continuare, din ea se poate reține că azotul bombardat cu particule alfa emite protoni. De aici s-a tras concluzia logică: protonul este un constituent al nucleului atomic. Concluzia a fost întărită și prin experiențe făcute cu alte elemente ușoare, astfel încît fizicienii se aflau acum în fața a două particule elementare: electronul și protonul.

Din nou agitație în lumea fizicienilor. Au apărut concluziile de generalizare, că atomii tuturor substanțelor sînt alcătuiți din protoni și electroni. În jurul nucleului, cu sarcină electrică pozitivă, s-ar afla electroni orbitali, iar în nucleu s-ar afla protoni și electroni. De pildă, atomul de heliu ar fi făcut din doi electroni orbitali și dintr-un nucleu care, la rîndul său, ar fi constituit din patru protoni (potrivit masei atomice egală cu 4) și doi electroni care, cu sarcinile lor negative vor neutraliza sarcinile pozitive a doi protoni (ținînd cont de valoarea sarcinii pozitive a nucleului, egală cu 2).

Dar nici acest tablou frumos nu avea să dureze mult. Dezvoltarea rapidă a teoriei a arătat curînd că trebuie exclusă ideea că substanțele ar fi alcătuite numai din protoni și electroni. Astfel, P.A.M. Dirac, în 1927, a demonstrat teoretic că este imposibil ca un electron să fie constrîns într-un spațiu atît de mic cît este nucleul atomului. Chiar și unele rezultate experimentale puneau la îndoială ipoteza că nucleul este constituit numai din protoni și electroni.

O nouă particulă: neutronul

Începutul deceniului '30 i-a găsit pe fizicieni într-o febrilă activitate de cercetare. Printre multele experimente, unul dintre cele mai importante este cel al fizicienilor Bothe și Becker, în anul 1930, ale cărui consecințe au produs o mutație radicală a concepției asupra structurii substanțelor.

Cei doi fizicieni și-au propus să verifice dacă nu cumva, în procesul de spargere a nucleelor bombardate cu particule alfa, se emit radiații gama, analog fenomenului de radioactivitate. În acest scop, ei au bombardat cu particule alfa o țintă cu beriliu. Pentru a opri particulele alfa, precum și eventualii protoni eliberați de nucleele de beriliu, sursa radioactivă și ținta au fost înconjurate cu un ecran de alamă gros de 2 mm. Eventualele radiații gama ar fi putut străbate cu ușurință ecranul, fiind apoi puse în evidență cu ajutorul unui detector.

Dar rezultatele experiențelor au fost dificil de interpretat. În orice caz, cei doi experimentatori au comunicat că beriliul bombardat cu particule alfa emite radiații foarte penetrante, care pot străbate un strat de plumb gros de peste 10 cm, avînd aceeași natură ca radiațiile gama, dar o energie cu mult mai mare.

Prin această experiență „nedecisă", pentru fizicieni s-a deschis o nouă „fereastră" spre microcosmos, care invita la cercetare. Așa au procedat soții Irène Curie și F. Joliot, care au repetat experiența, în 1932, folosind o cameră de ionizare. Pentru a studia mai amănunțit radiațiile emise de beriliul bombardat cu particule alfa, au folosit diverse tipuri de ecrane. Dar cu toate că soții Joliot-Curie au realizat experiențe remarcabile, interpretarea lor nu a fost inspirată, astfel că au trecut pe lîngă o mare descoperire.

Istoria nereușitei lor a început o dată cu constatarea pe care au făcut-o după ce au folosit ecrane care conțineau hidrogen (apă sau parafină). Soții Joliot-Curie au comunicat că au observat în acest caz o creștere considerabilă a curentului din camera de ionizare. Părea logică explicația dată de ei, că radiațiile gama, trecînd prin ecran, reușeau nu numai să ionizeze cîțiva atomi de hidrogen, dar chiar să pună în mișcare protonii formați astfel (nucleele de hidrogen). După părerea lor, acest efect nu putea fi observat la folosirea ecranelor metalice, deoarece nucleele atomilor de metal sînt mult mai grele decît protonii și deci nu pot fi puși în mișcare cu ușurința cu care sînt antrenați protonii.

La început explicația dată de F. Joliot și I. Curie părea plauzibilă, dar cînd lucrurile au fost privite mai îndeaproape au apărut dificultățile. Făcîndu-se calculele necesare s-a constatat că pentru a pune în mișcare protonii cu viteza înregistrată de experiență, ar fi fost necesar ca radiațiile electromagnetice (presupuse radiații gama) să aibă energii neverosimil de mari! Soții Joliot-Curie n-au găsit însă alte explicații și au publicat rezultatele, arătînd totodată și dificultățile interpretării.

Meritul de a fi depășit impasul de interpretare îi revine lui J. Chadwick. El a repetat experiențele, obținînd rezul-

James Chadwick

tate mult mai inconciliabile cu ipoteza radiațiilor penetrante de natură electromagnetică. Din datele experiențelor sale, Chadwick a dedus că protonii, și chiar nucleele altor elemente — observate de el —, sînt puși în mișcare de un nou tip de radiație, constituită din particule materiale, fără sarcină electrică și care au o masă apropiată de cea a protonului. Aceste particule neutre sînt scoase din nucleele atomilor de beriliu în urma ciocnirilor suferite cu particulele alfa.

Remarcabil este faptul că Chadwick a comunicat rezultatele sale la numai două săptămîni după apariția articolului soților Joliot-Curie!

Noua particulă a primit numele de *neutron*, din cauză că nu are sarcină electrică. (Neutronul are masa de 1,0086 u, fiind într-adevăr apropiată de cea a protonului, egală cu 1,00727 u.)

Acum lucrurile au fost clarificate. Beriliul bombardat cu particule alfa nu emite protoni, ci neutroni și radiații gama. Acestea din urmă s-au manifestat în experiențele lui Bothe și Becker, acționînd detectorul.

Astfel se încheie interesanta poveste a descoperirii neutronului, descoperire care a completat spectaculos cunoștințele despre componența nucleului atomic. Concluzia vremii

era acum că în nucleu există doar două tipuri de particule: protoni și neutroni.

Caracteristica principală a neutronilor este capacitatea lor de a străbate straturi groase de substanță, datorită lipsei de sarcină electrică. Se știe că particulele care posedă sarcină electrică, la trecerea prin substanță suferă frînări puternice din cauză că, întîlnind în calea lor alte particule încărcate electric, sînt deviate potrivit legilor cunoscute din electrostatică. De pildă, atunci cînd particula alfa, avînd sarcină electrică pozitivă, întîlnește un electron se pun în evidență forțe de atracție, pe cînd dacă trece prin apropierea unui nucleu (sarcină electrică pozitivă) se pun în evidență forțe de respingere. Frînarea puternică a particulei alfa la trecerea prin substanță se datorește în cea mai mare măsură acestor „ciocniri electrice" sau „interacții electrice". În schimb neutronii, lipsiți de sarcină electrică, pot traversa substanțele fără a se afla sub acțiunea forțelor electrice. Ei pot fi încetiniți doar prin ciocnirea efectivă cu nucleele; de aceea puterea lor de penetrare este de circa 10 000 de ori mai mare decît cea a particulei alfa.

Descoperirea neutronului a adus un nou val de euforie (al cîtelea?) în lumea fizicienilor. După cum a scris R.E. Marshak: „fizica a avut un moment luminos în care se părea că natura a primit o simplitate magnifică". Acum s-a ajuns la ideea că universul fizic putea fi explicat prin intermediul doar a trei particule elementare: electronul, protonul și neutronul. Iar diversele lor combinații se concretizează prin cele 92 de tipuri de atomi.

Potrivit acestei concepții, un atom consistă dintr-un nucleu dens, format din protoni și neutroni și dintr-un nor de electroni orbitali. Numărul și distribuția electronilor orbitali explică proprietățile chimice ale atomului, în timp ce protonii și neutronii din nucleu determină alte proprietăți ale atomului, adică masa, sarcina electrică a nucleului, izotopii etc.

Electronii, protonii și neutronii păreau să fie cărămizile de bază ale lumii, acele ireductibile entități materiale preconizate încă din antichitate.

Dar euforia avea să dispară curînd, o dată cu apariția de noi complicații. Nu numai pe măsură ce erau descoperite noi particule, ajungînd în zilele noastre să fie cuprinse în-

tr-un volum de peste 250 de pagini, ci chiar prin punerea în discuție a integrității protonului și neutronului, cărora li s-a retras statutul de particule elementare. După cum se va vedea în continuare, teoria quarkurilor a introdus o nouă ordine în fizica particulelor elementare și, se pare, că nici aceasta nu ar fi ultima...

Jocul nucleonilor și defectul de masă

În fața complicării crescînde a fizicii particulelor elementare, au existat totuși rațiuni pentru a considera nucleul ca fiind efectiv constituit numai din protoni și neutroni. Adică, protonii și neutronii ar fi într-adevăr cărămizile constituente ale nucleului. Din acest motiv au mai primit numele de *nucleoni*. Celelalte particule sînt considerate a avea un rol divers și sînt studiate ca atare.

Fizica nucleară și-a construit întregul edificiu pe modelul nucleului constituit numai din protoni și neutroni; *cu o primă aproximare* masa neutronului și a protonului se consideră egale cu 1, sarcina protonului egală cu 1, iar a neutronului zero. Deci, toată sarcina electrică a nucleului este datorată protonului. Dacă, de pildă, un nucleu are sarcina 4, înseamnă că el conține 4 protoni. În schimb masa nucleului este determinată atît de protoni, cît și de neutroni. De pildă, dacă un nucleu are masa 8, înseamnă că el are 8 nucleoni, adică suma protonilor și a neutronilor este egală cu 8.

Desigur, se poate proceda la fel pentru toți atomii, pentru a pune în evidență numărul de protoni și neutroni: numărul atomic Z semnifică numărul protonilor, iar diferența A-Z dintre numărul de masă sau nucleonic A și numărul atomic Z indică numărul de neutroni.

Pentru lumea atomului s-a deschis o extrem de fertilă cale de descriere a nucleelor, ca agregate de neutroni și protoni. Toate nucleele izotopilor puteau fi descrise cu o simplitate remarcabilă, sugerînd chiar alcătuirea unei sistematizări asemănătoare sistemului periodic al elementelor, pentru toți atomii existenți în natură.

O astfel de sistematizare este reprezentată prin diagrama protoni-neutroni, care a permis observarea unui fenomen interesant de constituire a nucleelor. Astfel, în nucleele mai ușoare, numărul protonilor este egal cu cel al neutronilor. Pe măsură ce sînt considerate nuclee cu numere atomice mai

mari, numărul neutronilor depășește din ce în ce mai mult pe cel al protonilor. Ca exemplu, unul dintre cele mai grele nuclee aflate în natură, izotopul 238 al uraniului, are 92 protoni și 238 — 92 = 146 neutroni!

Există și o explicație a acestei stări: deoarece protonii au sarcini electrice pozitive, între ei se exercită forțe de respingere care nu permit acumulări prea mari de protoni.

Toate amănuntele „păreau" să fie oarecum lămurite în privința nucleului atomic. „Păreau" deoarece a mai rămas o excepție, o mică nepotrivire, dar care s-a dovedit că stă la baza celei mai uluitoare relații din natură.

Totul a pornit de la măsurătorile de precizie asupra maselor atomice. Rezultatele acestor măsurători au arătat că masa nucleului, care, după cum se știe, are o valoare foarte apropiată de un număr întreg (numărul de masă = numărul protonilor + numărul neutronilor), *nu* este aceeași cu suma maselor protonilor și neutronilor constituenți. Acestei diferențe, dintre valoarea sumei maselor nucleonilor unui nucleu și valoarea efectivă a masei nucleului, i s-a dat numele de *defect de masă*.

De ce există „defectul de masă"? Unde se ascunde această „cantitate de masă" care aparent strică bilanțul?

Răspunsurile au fost date de fizicianul și matematicianul A. Einstein. El a așezat în fața problemei o teorie ce părea incredibilă.: masa și energia erau forme diferite asociate aceluiași lucru. Între ele pot avea loc conversii și reconversii fără pierderi sau cîștig. În felul acesta, Einstein a enunțat o lege fundamentală a naturii, legea conservării masei și energiei unui corp (înlocuind astfel cele două legi cunoscute din fizica clasică: legea conservării masei și legea conservării energiei, pe care le include).

Einstein a presupus că atunci cînd se formează un nucleu din protoni și neutroni trebuie să aibă loc o astfel de conversie. Energia necesară pentru a strînge protonii atît de aproape, ca atracția să învingă forțele de respingere electrice și să-i unească împreună cu neutronii este obținută pe seama conversiei unei părți a masei particulelor. Această presupunere a fost rezumată într-o formă deosebit de simplă:

$$E = mc^2,$$

unde E reprezintă energia (în jouli), m este masa substanței (în kilograme), iar c reprezintă viteza luminii (300 000 km/s).

Potrivit acestei relații, defectul de masă are de asemenea o interpretare simplă; el este totuna cu energia de legătură a nucleului, adică cu energia necesară pentru a desface complet nucleul în constituenții săi elementari (protoni și neutroni). Evident, între nucleoni se exercită forțe de un tip special, numite (deocamdată) forțe de legătură.

Trecînd la concretizarea relației lui Einstein, se poate calcula ușor că unui gram de substanță îi revine echivalentul unei energii enorme (întrucît pătratul vitezei luminii este o cantitate colosală!); dacă i s-ar asigura conversia completă ar rezulta o energie care ar putea produce multe milioane de kilovați-oră, manifestată prin energia particulelor elementare ale nucleelor atomilor eliberate de forțele de legătură.

De asemenea, prin calcule simple s-a ajuns la concluzia că energia de legătură pe nucleon este aproximativ aceeași pentru toate nucleele stabile, de circa 8 MeV.

Eliberarea energiei asociată nucleului atomic, care va fi considerată în una din secțiunile următoare, a propulsat fizica nucleară pe prim plan în existența și viitorul omenirii.

Un musafir din Cosmos: pozitronul

N-a trecut decît un an de la descoperirea neutronului și o nouă particulă avea să se adauge terțetului proton-neutron-electron. Nu era deloc plăcută părăsirea elegantei simplități de explicare a structurii atomului pe care o permitea existența celor trei patricule cunoscute.

Evenimentul a avut loc în anul 1932, în laboratorul fizicianului C.D. Anderson, care făcea cercetări asupra radiațiilor cosmice. Mai precis, experiențele sale aveau drept scop determinarea energiei cinetice a particulelor de origine cosmică.

Radiațiile cosmice reprezintă un fenomen universal, nu numai prezent în spațiul sistemului solar, al galaxiei noastre sau al altor galaxii, dar este de asemenea asociat cu procesele de viață a stelelor, cu exploziile supernovelor, cu radiogalaxiile (galaxiile care sînt „luminoase" prin lungimile de undă radio) și cu quasarii. De fapt, ele sînt detectabile aproape peste tot în Univers, cu instrumentele de care dispun laboratoarele în prezent. Mai mult, a fost stabilit că magnitudinea acestor radiații este astfel încît să facă din ele un factor decisiv în balanța energetică și dinamica unor sisteme ca radiogalaxiile și învelișurile gazoase ale supernovelor.

Radiația cosmică a fost pusă în evidență în anul 1889, de fizicienii J. Elster și H.F. Geitel, apoi de C.T.R. Wilson și Gockel, în 1910, sub forma existenței în atmosferă a unui agent de ionizare necunoscut, care descarcă un electroscop încărcat în prealabil. În 1912, V.F. Hess demonstrează că agentul de ionizare este de origine extraterestră.

Care este originea acestor radiații și cum se manifestă? În prezent se apreciază că adînc în interiorul celor mai multe stele, temperaturile și presiunile determină reacții nucleare care, în schimb, eliberează energie ce traversează corpul stelei, prevenindu-i prăbușirea. Cînd această energie atinge suprafața stelei, este radiată în spațiu. Unele dintre aceste radiații sînt sub formă de lumină vizibilă, adică ceea ce se vede privind steaua. Alte radiații, invizibile, sînt sub forma de unde radio, radiații X și alte tipuri, care abia în ultimul timp au fost detectate și măsurate de astronomi. Și, în fine, suprafața stelei emite șuvoaie de particule elementare, în special protoni, care se deplasează în spațiu.

În cazul Soarelui nostru, aceste particule formează ceea ce numim noi vîntul solar — un torent susținut de particule care lovesc Pămîntul. În cazul că este vorba de o stea îndepărtată, particulele pot călători milioane de ani fără să întîlnească în calea lor un corp material. Astfel că oricum o fracțiune infinitezimală de particule provenind din Soare și alte stele din galaxia noastră vor lovi straturile superioare ale atmosferei terestre. Acestor particule li s-a dat numele generic de *radiații cosmice*. Deși emisiunea de radiații cosmice nu are o prea mare importanță în bilanțul energetic al stelelor, ele prezintă, în schimb, o importanță covîrșitoare pentru înțelegerea particulelor elementare.

Marea majoritate a radiațiilor cosmice o formează protonii. Aceștia nu sînt numai proveniți din resturile unor procese stelare, dar și din dispersiile a tot felul de particule. De pildă, în experimentele făcute cu un laborator spațial au fost observate nuclee întregi de atomi de uraniu.

Radiațiile cosmice care vin de la Soare au energii relativ modeste, adică aproape de cele ale particulelor emise de substanțele radioactive. Dar există și cîteva grupuri de radiații cosmice care au fost accelerate, undeva în galaxie, la energii extrem de înalte, printr-un proces încă necunoscut. Or, tocmai această fracțiune de radiații cosmice, de foarte mari energii, interesează cel mai mult; ar fi posibil ca aceste energii să fie cu mult superioare celor care pot fi realizate în instalațiile din laboratoarele timpului nostru.

Atunci cînd unul dintre acești protoni de foarte mare energie pătrunde în atmosfera terestră, el va coborî spre suprafața Terrei pînă cînd se ciocnește cu un nucleu. În medie, o astfel de particulă poate pătrunde circa 1 km în atmosferă înainte de a ciocni un nucleu, dar, desigur, unii protoni pot călători pe distanțe mai mici sau mai mari. Ca rezultat al acestei ciocniri, unele din enormele energii cinetice ale protonilor suferă conversii și pot fi regăsite ca masă, emițîndu-se simultan o jerbă de particule. Cîteva dintre aceste particule secundare vor avea de asemenea energie cinetică; astfel că, pătrunzînd mai adînc în atmosferă vor putea întîlni alte nuclee, și ele, la rîndul lor, vor produce jerbe de alte particule secundare.

Procesul se poate caracteriza ca avînd formă de cascadă, în care produsele secundare ale ciocnirilor la un anume nivel devin proiectile primare la nivelul imediat inferior.

La fiecare nivel al cascadei, cîteva particule se ciocnesc cu nuclee din atmosferă, în timp ce altele continuă să se deplaseze spre suprafața Pămîntului. Atunci cînd ating suprafața, sînt numite *jerbe de radiații cosmice*. Depinzînd de energia radiațiilor incidente, aceste jerbe conțin milioane de particule și se pot întinde pe cîțiva kilometri pătrați de pe suprafața Pămîntului. În tot timpul, prin corpul omenesc, pe minut, trec cîteva particule din astfel de jerbe de radiații cosmice.

Din cele de mai sus se poate deduce ușor că prin interacțiile din atmosferă ale radiațiilor cosmice, omul are la dispoziție un fel de laborator natural, în care poate observa și analiza o serie de procese din lumea subatomică. Într-un astfel de laborator se poate întîmpla o mare varietate de procese, care apar la ciocnirile particulelor de foarte mari energii. Așa se explică de ce o mare parte a cunoștințelor despre proprietățile particulelor elementare vin în primul rînd din experimentele făcute cu radiații cosmice.

Pentru a ilustra bogăția informațiilor pe care fizicienii le-au primit, între anii 1930—1940, din experimentele făcute cu radiațiile cosmice, poate fi menționată prima și cea mai importantă: descoperirea primei particule de antimaterie, de C.D. Anderson, în 1932.

Fizicianul Anderson făcea experiențe pentru a determina energia cinetică a particulelor de origine cosmică. În acest scop, cu ajutorul unei camere cu ceață urmărea traiectoriilor acestor particule care veneau de undeva, din Cosmos. Camera cu ceață se găsea într-un cîmp magnetic, sub al cărui efect traiectoriile particulelor erau curbate; curbura era cu atît mai mare, cu cît energia particulelor era mai mică. Măsurînd

curburile traiectoriilor, se putea deduce ușor energia particulelor. Dar totodată cîmpul magnetic mai permitea o precizare și anume a sarcinii particulelor; adică, particulele cu sarcini electrice de semne diferite erau deviate în sensuri opuse.

Marea descoperire a lui Anderson a constat în observarea unei traiectorii care avea caracteristicile electronilor (sarcină negativă), dar *erau dotate cu sarcină electrică pozitivă*. La început a crezut că era vorba de protoni de foarte mare energie, dar măsurătorile au arătat că este vorba de particule cu masa mult mai mică, egală cu cea a electronului, doar că sarcina era pozitivă.

Anderson a numit noua particulă *pozitron* (forma contrasă de la *posi*tive elec*tron*). Totodată a propus ca pentru electron să fie folosit numele de „negatron", dar propunerea nu a avut ecou. În prezent a intrat în limbajul fizicienilor și numele de *antielectron*, $\bar{e}$, care semnifică apartenența sa la *antimaterie*. Despre antimaterie, mai pe larg, se va vorbi în una din secțiunile următoare.

După identificarea pozitronului, prezența sa a fost recunoscută nu numai în fenomene datorate radiațiilor cosmice, ci și în alte fenomene, realizabile în laboratoare.

Posibilitatea de a avea la dispoziție pozitroni le-a permis fizicienilor să facă noi descoperiri uimitoare. Se știe că în condiții normale electronii au totdeauna sarcini electrice negative, iar nucleul atomului are sarcină pozitivă. De aceea, pozitronul nu poate fi o particulă care „se ascunde" într-un atom normal, pentru a fi pus în libertate de o ciocnire cu radiațiile cosmice.

Atunci, de unde apar pozitronii? Explicația a venit de la descoperirea că lovind o substanță cu un flux de fotoni gama, cu o energie mai mare de 1 MeV, iau naștere perechi constituite dintr-un electron și un pozitron. Fenomenul are loc într-un cîmp de forțe suficient de puternic, cum este, de pildă, cel generat de un nucleu în imediata sa apropiere. Apariția perechii electron-pozitron constituie una dintre cele mai elegante dovezi ale dublului aspect al substanței, masă și energie, pus în evidență de ecuația $E = mc^2$.

Mecanismul emiterii pozitronului poate fi explicat prin procesul ce poate avea loc într-un nucleu aflat în stare excitată. La revenirea sa la starea fundamentală, nucleul emite

un foton. Dacă acest foton are o energie mai mare decît 1,02 MeV, care nu este neobișnuită, el se poate „descompune" pentru a genera o pereche electron-pozitron. Fenomenul poate fi considerat ca o tranziție spontană. Mai există și alte mecanisme care să conducă la emisia de pozitroni. Însă în aceste procese apariția perechii electron-pozitron nu este spontană; mai degrabă este nevoie de un aport energetic exterior.

Valoarea de 1,02 MeV nu este întîmplătoare. Ea reprezintă masa de repaus a perechii electron-pozitron, egală fiecare cu circa 0,51 MeV/c^2. Dată fiind relația de echivalență $E = mc^2$, în fizica atomică este convenabil, și se folosește curent, exprimarea unităților de masă în unități de energie și viceversa. Astfel, masa electronului (și cea a pozitronului), $m_e = 0{,}51$ MeV/c^2. Deci energia de 1,02 MeV amintită mai sus în procesul de formare a perechii electron-pozitron este chiar necesarul pentru formarea maselor celor două particule.

Procesul prin care apare perechea electron-pozitron pe seama energiei a fost numit *materializare*, la propunerea fizicienei Maria Curie. În prezent fenomenul mai este numit *generare de perechi*.

Dar există și procesul invers, de dematerializare a unei perechi electron-pozitron. Pozitronul nu este o particulă cu o viață prea lungă: Atunci cînd întîlnește în calea sa un electron, cele două particule dispar, se *anihilează*, iar în locul lor rămîn 2—3 fotoni gama.

Procesele de generare și anihilare a perechii electron-pozitron sînt considerate că reprezintă o strălucită verificare a relației de echivalență dintre masă și energie. Totodată, descoperirea experimentală a pozitronului a constituit un adevărat triumf al teoriei relativiste a electronului, elaborată de P.A.M. Dirac, care, încă din 1930 a prevăzut teoretic posibilitatea existenței antielectronului, adică a unui electron cu sarcină pozitivă.

Anihilarea rapidă a perechii electron-pozitron poate explica raritatea pozitronilor în natură față de electroni. Într-o lume în care ar prevala pozitronii (o antilume), electronii ar fi o raritate, suferind anihilări analoage.

O dată cu descoperirea pozitronului, numărul particulelor elementare s-a ridicat la patru: protonul, neutronul, electronul și pozitronul. Au început să fie prea multe și nimeni nu își imagina, pe timpul acela, că acesta era abia începutul...

Forțele nucleare

Descrierea componenței nucleelor atomice nu era însă suficientă pentru a explica proprietățile lor. În statutul de existență a nucleelor mai trebuiau înscrise unele noțiuni care se vor dovedi esențiale în analizarea stărilor lor de stabilitate.

În primul rînd, datorită faptului că nucleonii posedă masă, între ei se vor exercita forțe de atracție gravitaționale. Dacă se face însă un calcul, aplicînd legea atracției universale a lui Newton din mecanica clasică se va constata că datorită maselor nucleonice mici, cu toată distanța mică dintre ele, aceste forțe sînt extrem de mici. În orice caz nu sînt suficiente pentru a explica enorma energie de legătură a nucleului. De exemplu pentru nucleul de heliu, care are 4 nucleoni, energia de legătură este de 28 MeV; ea crește o dată cu numărul atomic, ajungînd astfel la 1,78 GeV pentru izotopul uraniu-238.

Pe de altă parte, protonii avînd sarcini electrice pozitive, potrivit legilor electrostaticii în fiecare nucleu care are cel puțin doi protoni se exercită forțe electrice de respingere.

Fizicianul Soddy a dat o interpretare intuitivă a forțelor de respingere, arătînd că dacă s-ar putea concentra un gram de protoni într-un punct de pe Terra, și un alt gram la antipodul său, respingerea dintre aceste două grămezi ar fi echivalente cu o forță de 28 tf!

A apărut astfel încă o enigmă pentru fizicieni. Anume, dacă între constituenții nucleului acționează doar cele două forțe cunoscute (gravitațională și electrostatică), forța predominantă ar fi cea de respingere. Protonii și neutronii s-ar împrăștia și nucleul n-ar mai putea exista.

Dar nucleul atomic este stabil și nu numai atît, dar nucleonii sînt atît de legați între ei încît pentru a-i despărți este nevoie de milioane de electron-volți. Mai exact spus: pentru fiecare nucleu o energie egală cu energia sa de legătură.

Rezolvarea enigmei cere o concluzie logică: în nucleu trebuie să mai acționeze și alte tipuri de forțe, de atracție, care să aibă o astfel de intensitate încît să depășească res-

pingerea electrostatică. Cum era și normal, acestor forțe li s-a dat numele de *forțe nucleare*, atribuindu-li-se la început doar calitatea că trebuie să acționeze exclusiv pe distanțe extrem de mici, de nivelul celor care există între nucleoni.

Astfel, cercetătorii timpului au avut în față două probleme succesive: să găsească legile forțelor nucleare și apoi să calculeze proprietățile nucleare care rezultă.

(După cum se va vedea în secțiunile următoare, în zilele noastre au fost puse la punct teorii care explică natura forțelor nucleare într-un context general în care este urmărită o problemă deosebit de importantă pentru știință: unificarea forțelor fundamentale și a particulelor elementare.)

În pas cu cunoștințele existente ale anilor '30, un pas fundamental în explorarea forțelor nucleare a fost făcut de fizicianul Wigner, care a introdus noțiunea de energie medie de legătură pe nucleon. El a pornit de la ideea că în acea stare agregată de nucleoni pe care o numim nucleu, fiecare particulă se află în sfera de atracție a tuturor celorlalte. În concluzie, energia de legătură a fiecărui nucleon ar trebui să crească o dată cu creșterea numărului total de particule din nucleu. Cu alte cuvinte, ea ar trebui să fie cu atît mai mare cu cît se trece de la nuclee mai ușoare la nuclee mai grele. Or, lucrurile nu stau așa. Există o energie medie de legătură pe nucleon, care se obține împărțind energia de legătură a nucleului la numărul de nucleoni. S-a găsit că această energie este aproape constantă pentru orice nucleu (dar micile diferențe joacă un rol important în eliberarea energiei nucleare, în fisiune și fuziune!).

Forțele nucleare se manifestă diferit, în funcție de distanțele dintre nucleoni: la distanța de 4 fermi (1 fermi = $=10^{-15}$ m) ele se manifestă ca forțe de atracție, iar la distanța de 0,4 fermi ele sînt de respingere. Deci în interiorul nucleului atomic, jocul forțelor nucleare cu distanțele îi asigură stabilitatea.

Cîteva modele

Cele arătate mai sus în legătură cu forțele nucleare, deși azi sînt doar aspecte de interes istoric, au permis totuși fizicienilor să încerce să-și imagineze modelul nucleului atomic. Propunerile au fost numeroase și toate căutau să unească organizat rezultatele experiențelor cu o speculație intuitivă,

astfel ca modelul să devină un ghid pentru eventuale previziuni. Printre cele mai importante, deși contradictorii, sînt *modelul în straturi*, *modelul picăturii* și *modelul optic*. Fiecare model are partea sa de adevăr în interpretarea cîte unei comportări particulare a nucleului atomic.

Cea mai simplă idee a fost să se adopte pentru modelul nucleului atomic același model ca și cel planetar al atomului. După cum s-a considerat că electronii se mișcă în jurul nucleului „pe orbite diverse", reunite în *pături* sau *straturi*, tot așa se putea considera că și nucleonii pot fi grupați „pe orbite".

Fiecare nucleon se mișcă independent pe orbita sa, sub influența unei forțe ce reprezintă efectul mediu al tuturor celorlalți nucleoni, analog mișcării unui electron care, pe orbita sa, este supus acțiunii unei forțe medii care rezultă din influența pe care o exercită nucleul și ceilalți electroni.

Pe de altă parte, observînd legătura dintre numărul de electroni orbitali și stabilitatea atomilor, s-a obținut un rezultat interesant. Atunci cînd atomul are o pătură completă de electroni pe cea mai îndepărtată orbită a sa, el este deosebit de stabil. Este vorba de așa-numitele gaze nobile: heliul (primul strat complet, de 2 electroni), neonul (al doilea strat complet, 10 electroni), argonul al treilea strat complet, 18 electroni) etc. Stabilitatea acestor atomi (nu formează ioni și nu intră în reacții chimice decît cu mari dificultăți) este atît de caracteristică încît numerele lor atomice (adică numărul electronilor, orbitali) merită o atenție specială: 2, 10, 18, 36 și 54. Aceste numere (se observă că toate sînt pare) au fost numite *numerele magice* ale tabelului periodic al elementelor.

Este de asemenea interesantă observația că și nucleonii formează anumite numere magice. Organizînd o sistematizare a izotopilor elementelor chimice se constată că fie protonii, fie neutronii au o mare tendință de a se prezenta în număr par. Elementele ale căror nuclee au un număr par de protoni au, în general, un număr de izotopi care este mult mai mare decît cel al elementelor de număr atomic impar! Pe de altă parte, studiul abundenței elementelor, pe Terra duce la concluzia că elementele cu numere atomice pare constituie circa 87% din crusta terestră. În întreaga listă a izotopilor nu există mai mult de 6 nuclee stabile consti-

tuite dintr-un număr impar de protoni și dintr-un număr impar de neutroni.

Toate aceste statistici indică faptul că nucleele cu numere pare de protoni și neutroni sînt cele mai stabile. Printre acestea, în special, există unii atomi care se dovedesc deosebit de stabili; aceștia prezintă de altfel și energia de legătură pe nucleon mai mare decît a celorlalte nuclee: heliul (2 protoni, 2 neutroni), oxigenul (8 neutroni, 8 protoni), calciul (20 protoni), nichelul (28 protoni), bariul (82 neutroni), plumbul (82 protoni) etc.

Se poate deci scrie și pentru nuclee o listă de *numere magice*, analoagă celei făcute pentru atomi. Acestea sînt: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Nucleele cu aceste numere de protoni sau de neutroni au o stabilitate excepțională.

Autorii modelului cu organizare „planetară" l-au imaginat ca fiind format din pături (straturi) complete aparținînd nucleului, analog păturilor de electroni ale atomului, astfel: primul strat nuclear ar putea conține 2 nucleoni, al doilea — 6, al treilea — 12, al patrulea — 8, al cincilea — 22, al șaselea — 32, al șaptelea — 44.

Modelul în pături a suferit mai multe perfecționări și permite interpretarea unui mare număr de date experimentale asupra comportării nucleului.

În ce privește stabilitatea unor nuclee, se pare că forțele nucleare tind să favorizeze formarea de perechi de particule (de pildă, doi neutroni și doi protoni), precum și perechi de perechi (avînd în vedere spinul asociat particulelor elementare).

Dacă nu ar exista forțele electrice de respingere (interacții electrice), cel mai stabil nucleu ar fi acela în care numărul neutronilor ar fi egal cu cel al protonilor. Dar, oricum, prezența interacțiilor electrice deplasează echilibrul în favoarea unui număr mai mare de neutroni; dar un nucleu cu prea mulți neutroni nu mai este stabil, deoarece nu suficient de mulți sînt împerecheați cu protonii. Nici nucleul cu prea mulți protoni nu este stabil, deoarece interacțiile electrice de respingere sînt mult prea mari.

Nucleele instabile se dezintegrează, proces ce caracterizează fenomenul de radioactivitate.

Pentru a depăși unele dificultăți destul de grave pe care le întîmpina modelul nuclear în pături (numit și *model uniparticulă)* în interpretarea rezultatelor de ciocniri ale neutronilor cu nucleele, Bohr a propus (1936) *modelul picăturii*. Faptul care a condus la acest model a fost analogia ce se putea face între forțele superficiale care acționează la formarea unei picături de lichid, cu cele care acționează asupra nucleonilor ce formează nucleul atomic. Anume, dacă se consideră că nucleonii sînt ținuți împreună de forțe de schimb care se manifestă între particulele învecinate, atunci fiecare nucleon din interiorul nucleului este acționat în toate direcțiile, în egală măsură. În schimb nucleonii care se află la suprafața nucleului sînt atrași spre interior, existînd astfel un efect superficial care tinde să dea nucleului forma sferică. Or, această imagine concordă perfect cu cele ce se petrec într-o picătură de lichid, a cărei formă sferică este datorată tensiunii superficiale. În acest sens se poate spune că un nucleu atomic ar putea fi asemănat cu o picătură de lichid, de unde numele dat modelului.

Modelul picăturii a avut succese remarcabile în explicarea unor aspecte caracteristice ale reacțiilor nucleare. Dar, ca orice model, fiecare își are neajunsurile sale. Astfel, modelul în pături consideră nucleul ca o singură particulă și nu are în vedere interdependența dintre nucleoni. La rîndul său, modelul picăturii nu permite calculul proprietăților individuale ale nucleelor și nici nu poate explica stările nucleare excitate.

Și de data aceasta fizicienii au încercat să aplice o metodă care deseori s-a dovedit utilă: compromisul. Astfel a apărut modelul generalizat, care încearcă să țină seama atît de particularitățile individuale ale nucleonilor, cît și de cele colective. Dar și acest model, deși este folosit în explicarea unor caracteristici ale nucleului, își are limitele sale, fapt care i-a determinat pe fizicieni să mai caute... alte modele.

Chiar dacă de modele fizicienii nu au dus lipsă, totuși, care este în prezent imaginea pe care o au despre nucleu? Răspunsul nu este prea simplu și plătește tribut insistențelor cu care modul de gîndire caută întotdeauna analogii cu imagini deja cunoscute și bine fixate. Pentru cei care doresc, totuși, o astfel de imagine, se poate spune că nucleul seamănă cu un cristal, cu un lichid și cu un gaz, dar totodată cu nici unul dintre acestea. Adică, nucleul poate fi un „gaz nuclear", fiind format din particule în continuă mișcare, dar avînd

un volum finit și o densitate constantă ne face să-l bănuim lichid, iar unele din proprietățile sale îl apropie chiar de starea cristalină...

O particulă ipotetică: neutrinul

Acceptînd, deocamdată, doar aspectele prezentate despre atom și nucleu, pot fi explicate cîteva fenomene nucleare întîlnite de fizicieni la studierea radioactivității.

După cum s-a arătat anterior, atunci cînd un atom trece dintr-o stare cuantică excitată la un nivel energetic inferior, emite un foton. Un proces asemănător se petrece și cu nucleul atomic: un nucleu care se află într-o stare excitată, trecînd la o stare energetică mai joasă emite un foton a cărui frecvență este superioară frecvenței radiațiilor X. Este vorba de fotonii radiațiilor gama emise de substanțele radioactive.

Nucleul ajunge la o stare excitată și prin faptul că din el sînt emise particule alfa sau beta. Anume micșorarea numărului de particule din nucleu îl lasă oarecum „supradimensionat energetic", adică excitat, iar trecerea sa într-o stare fundamentală corespunzătoare se face cu emisiunea de fotoni gama.

Acum se poate înțelege ușor că emisiunea radiațiilor gama de nucleele substanțelor radioactive este totdeauna un așazis proces secundar. Procesul primar este emisiunea de particule alfa și beta (dezintegrarea alfa și dezintegrarea beta).

Chiar dacă modelul nucleului presupune că el este format doar prin protoni și neutroni, se consideră că particulele alfa (agregat format din doi protoni și doi neutroni) emise de nucleele substanțelor radioactive există ca atare în interiorul său. Existența lor nu contravine modelului amintit; faptul indică doar că unii protoni și neutroni sînt mult mai puternic uniți în interiorul nucleului, formînd particulele alfa.

Ca de obicei, s-a căutat o explicație a fenomenului de dezintegrare alfa prin intermediul legilor clasice și s-a ajuns la... un impas. Mecanica clasică interzice ieșirea spontană a unor particule din nucleu, din cauza forțelor nucleare care ar constitui o barieră de netrecut. După datele cunoscute, energia unei particule alfa este de 2—9 MeV, în timp ce bariera energiei de legătură a nucleului atinge valori de ...20—25 MeV! O trecere prin această „barieră" nu poate fi concepută în lumina teoriilor clasice. Și totuși, particulele alfa sînt emise de nucleele substanțelor radioactive...

„Salvarea" a venit în anul 1928, cînd G. Gamow a depășit impasul fizicienilor, tratînd problema prin prisma mecanicii ondulatorii. Potrivit acestei mecanici, chiar în cazul în care particula alfa are o energie mai mică decît cea necesară străpungerii barierei de potențial, ea are o anumită probabilitate de a ieși din nucleu. Această probabilitate este foarte mică dacă energia particulei alfa este mult mai mică decît cea necesară învingerii „barierei" energiei de legătură a nucleului, dar probabilitatea crește treptat pe măsură ce energia particulei se apropie de această valoare. Explicația a permis să fie date interpretări satisfăcătoare a celor mai multe fenomene de dezintegrare alfa. De asemenea, teoria explică și enormele diferențe ale timpului de înjumătățire al substanțelor radioactive, care, după cum se știe, oscilează între fracțiuni de secundă și multe milioane de ani, precum și faptul că substanțele cu timpul de înjumătățire mai scurt emit particule alfa cu energii mai mari.

Dar în procesul de radioactivitate sînt emise și particule beta, adică electroni, de asemenea din interiorul nucleelor substanțelor radioactive. De unde însă electroni? Se știe că nucleul este format doar din protoni și neutroni și nicidecum electroni. Cum se poate explica această contradicție aparentă?

Problema pare cel puțin ciudată. Trebuia să se explice faptul că dintr-un nucleu sînt emise particule... pe care nu le conține. De fapt, fizicienii s-au aflat în fața unei probleme asemănătoare atunci cînd au căutat să explice emisia luminii (radiație electromagnetică) la nivelul atomilor. Radiația electromagnetică nu părea să facă parte din structura atomului și totuși, atomii emiteau astfel de radiații! În privința luminii, contradicția a fost înlăturată prin ipoteza că atomul își poate modifica starea (trecînd de la o stare caracterizată printr-o energie mai mare, la o stare cu o energie inferioară), emițînd simultan cuante de lumină (fotoni). Deci se poate spune că deși radiația electromagnetică nu face parte din structura atomului, totuși ea are în atom un fel de „existență latentă".

Apare ca firească încercarea fizicienilor de a trata analog emisiunea de electroni din nucleul atomic. Dar de data aceasta a apărut o dificultate gravă: procesul contrazicea o lege

fundamentală a fizicii, legea conservării energiei. Adică, atunci cînd un atom trece dintr-o stare în care are o anume energie la o stare cu o energie inferioară, el emite o cuantă a cărei energie este bine determinată și egală cu energia eliberată în procesul de tranziție atomică. Or, se aștepta ca același lucru să se petreacă și în cazul emisiei de electroni din nucleu. Dar lucrurile se petreceau cu totul neașteptat. Dacă un anume număr de nuclee radioactive treceau dintr-o stare A într-o stare B, emițînd electroni, era de așteptat ca toți electronii emiși să aibă aceeași energie, egală cu diferența dintre stările A și B: în schimb, electronii emiși aveau energii de toate valorile posibile, între zero și o valoare maximă de 0,78 MeV.

Desigur, fizicienii nu puteau accepta că se aflau în fața unei excepții a legii fundamentale a naturii (legea conservării energiei). Dar toate măsurătorile făcute timp de un deceniu, între 1920 și 1930, oricît de îngrijite erau, arătau foarte clar că valorile energiei electronilor emiși în dezintegrarea beta se înscriu în spectrul continuu 0—0,78 MeV. Toate aparențele lăsau să se întrevadă concluzia că și în privința legii conservării energiei ar trebui probabil aduse corecții, dacă nu să fie chiar renegată...

Dar și de data aceasta a apărut o explicație salvatoare, care pe lîngă lămurirea fenomenului lăsa totodată în vigoare legea conservării energiei. Este vorba de ipoteza fizicianului W. Pauli, conform căreia la dezintegrarea beta se emite, pe lîngă electron și o particulă neutră, care preia diferența de energie ce ar trebui să revină electronului. Noua particulă a fost numită *neutrin*, și se prezicea că nu are sarcină electrică, iar masa este mai mică decît cea a electronului. (De fapt, problema masei neutrinului este și astăzi în discuția specialiștilor.) Se presupune că are o mare putere penetrantă, astfel că poate trece foarte aproape de alte particule fără a fi capturată.

Ipoteza lui Pauli presupune că diferența de energie dintre nucleul inițial (înainte de dezintegrarea beta) și nucleul final (după dezintegrarea beta) se împarte între electronul și neutrinul emis (de fapt, cum se va dovedi ulterior, este vorba de antineutrin), într-un raport oarecare. Astfel, dintr-un număr oarecare de nuclee radioactive vor fi generate multe perechi electron-neutrin de toate energiile posibile, dar suma

energiilor celor două particule are totdeauna aceeași valoare, adică diferența dintre energia nucleului inițial și cel final.

În fine, din cauză că neutrinii nu posedă sarcină electrică și au o masă insesizabilă, ei nu pot fi observați prin nici o metodă directă; ceea ce poate fi observat sînt doar electronii emiși de nuclee, cu toate valorile de energie posibile în limitele date.

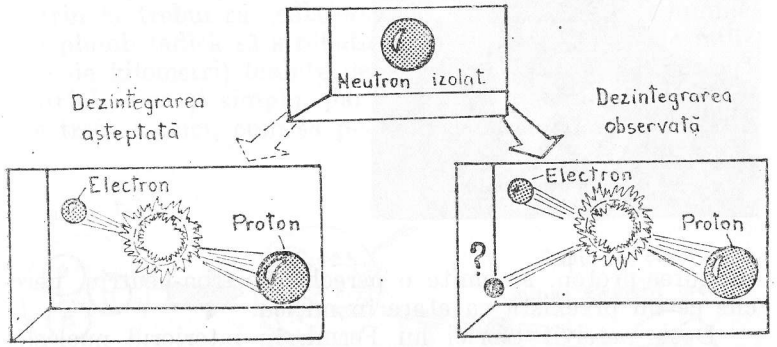


Fig. 15. Dezintegrarea spontană a neutronului. În loc să se obțină doar un electron și un proton, și-a semnalat prezența o a treia particulă — era antineutrinul.

Iată cum a fost introdusă în fizică o nouă particulă, o particulă ipotetică, foarte rapidă, fără masă de repaus sesizabilă, fără sarcină electrică, posedînd însă energie și care părea mai degrabă că există doar pentru a-i scoate pe fizicieni din încurcătură. Unii chiar au numit-o „particula fantomă". Într-adevăr, se poate susține că fără neutrin, dezintegrarea beta nu ar fi fost consistentă cu legea conservării energiei.

Chiar dacă în anii '30 fizicienii nu aveau dovada experimentală a existenței neutrinilor, ei au fost acceptați alături de electroni, în dezintegrarea beta. A mai rămas întrebarea: de unde electroni în nucleu?

Răspunsul l-a dat E. Fermi, în 1934, elaborînd o teorie bazată pe ipoteza lui Pauli, prin care considera că neutronul și protonul din interiorul nucleului nu reprezintă altceva decît stări cuantice diferite ale unei aceleiași particule — nucleonul. Atunci cînd un nucleon trece de la starea-neutron

Enrico Fermi

la starea-proton, se emite o pereche electron-neutrin, pereche ce nu preexistă ca atare în nucleu.

Deci, potrivit teoriei lui Fermi, în interiorul nucleelor substanțelor radioactive pot avea loc transformări spontane ale neutronilor în protoni. Dar și un neutron liber poate suferi spontan o aceeași transformare; el ar putea trăi în medie 12 minute, după care s-ar transforma într-un proton și un electron. Dar astfel de transformări nu pot fi observate, deoarece în natură nu pot exista neutroni liberi pe o durată atît de lungă; într-un timp foarte scurt neutronul ar reacționa cu unul din nucleele pe care le întîlnește.

După cum se va vedea în secțiunile următoare, în unele cazuri substanțele radioactive emit pozitroni. Potrivit teoriei lui Fermi, această emisiune poate fi interpretată ca un proces invers celui precedent, adică s-ar datora transformării unui proton în neutron. Bineînțeles, și în acest caz apare neutrinul ca pereche a pozitronului. După cum s-a constatat ulterior, această particulă „de compensare" este într-adevăr neutrinul, față de antineutrinul care apare în dezintegrarea beta, deci particule complementare.

Teoria dezintegrării beta, potrivit căreia protonul și neutronul sînt considerate stări cuantice diferite ale unei particule unice, nucleonul, i-a sugerat lui W. Heisenberg

ideea de a introduce existența unor *forțe de schimb* între protonii și neutronii din nucleu.

Este ușor de imaginat străduința și ambiția cercetătorilor de a dovedi experimental existența reală a ipoteticului neutrin. Dar ani de zile acesta s-a sustras oricărei metode de detecție. Neutrinul interacționează extrem de rar cu un nucleu atomic. Dacă radiațiile gama, care sînt cele mai penetrante radiații, trebuie să străbată în medie circa 3 m într-un perete de plumb pentru a reacționa cu unul din nuclee, un neutrin ar trebui să „călătorească", în medie, 4 ani lumină prin plumb (adică să străbată circa 40 de milioane de milioane de kilometri) înainte de a interacționa cu un nucleu! Neutrinii, pur și simplu, par să nu „simtă" substanța prin care trec. Atunci, cum să poată fi „surprinși" făcînd ceva?

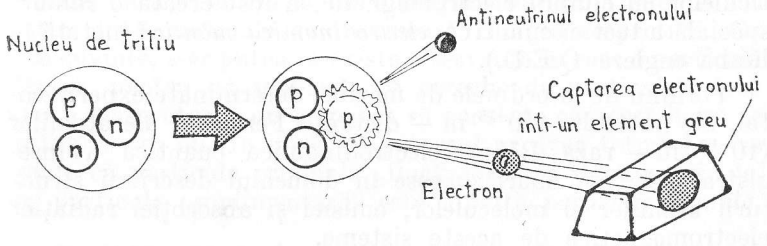


Fig. 16. Fizicianul sovietic E.F. Tretiakov a arătat, în 1980, că a pus în evidență o mică masă a neutrinului, prin experiențe de mare finețe, constînd în capturarea electronului emis prin dezintegrarea beta a tritiului, de un element greu. Deocamdată verificările sînt în curs.

Și totuși, în 1956 a fost posibilă detectarea neutrinilor într-o experiență de o „virtuozitate eroică", în care a fost implicat puternicul reactor nuclear din Savannah River (S.U.A.). Fizicienii Clyde Cowan și Frederick Reynes au arătat că circa 10% din energia nucleară a reactorului este emisă sub formă de neutrini, avînd fiecare o energie de cîțiva megaelectron-volți.

Particule reale și particule virtuale

O dată cu introducerea teoriei cuantice a fost admisă și existența unei forme speciale a materiei — cîmpul. Astfel, se spune că între două particule încărcate electric se exer-

cită acțiuni reciproce prin intermediul cîmpului electromagnetic. Iar potrivit teoriei, cîmpul electromagnetic în care perturbațiile se propagă sub formă de unde prezintă și un aspect corpuscular, reprezentat prin fotoni. Mecanismul prin care pot fi transmise interacțiile dintre doi electroni ar putea fi precizat astfel: fiecare dintre cei doi electroni este în interacțiune cu cîmpul electromagnetic în care se află; aceasta corespunde, în limbaj corpuscular, că electronul are posibilitatea să emită un foton pe care celălalt îl poate absorbi. Vorbind de interacții între doi electroni ori de posibile emisiuni și absorbții de fotoni este același lucru. Această noțiune de particulă asociată unui cîmp este fundamentală și generală.

Pentru studiul acestor fenomene, de interacțiune a particulelor cu cîmpul electromagnetic, a fost creată o ramură specială a teoriei cuantice, *electrodinamica cuantică* (notată în limba engleză Q.E.D.).

Pornind de la ordinele de mărime determinate experimental, ale nucleului (10^{-15} m — distanța Fermi) și ale atomilor (10^{-10} m — raza Bohr), electrodinamica cuantică a înregistrat cele mai mari succese în domeniul descrierii structurii atomilor și moleculelor, emisiei și absorbției radiației electromagnetice de aceste sisteme.

În procesele de interacțiune a electronilor cu cîmpul electromagnetic se consideră că e (sarcina elementară) este o *constantă de cuplaj*, care arată cît de puternic interacționează sarcinile elementare una cu cealaltă. În acest sens, cîmpul electromagnetic poate fi considerat ca o „construcție ajutătoare" pentru discutarea interacțiilor dintre sarcinile electrice.

Ținînd cont și de alte constante ale electrodinamicii cuantice (viteza luminii și constanta de acțiune h), fizicienii au dedus *experimental* constanta care măsoară intensitatea de cuplaj a doi electroni sau doi protoni (energia lor electrostatică), aflați la o distanță egală cu raza Bohr unul de celălalt; a fost numită *constanta de cuplaj electromagnetic* sau *constanta structurii fine* și are valoarea $\alpha = 1/137$.

Pînă în prezent nu se poate explica teoretic de ce are tocmai această valoare, ea fiind determinată doar experimental. Oricum, constanta structurii fine descrie cuplajul cu cîmpul electromagnetic al oricărei particule elementare

de sarcină e. Din cauză că este mai mică decît 1, interacția electromagnetică este destul de slabă.

Electronul, ca particulă subatomică, se comportă potrivit descrierii legilor mecanicii cuantice. După cum s-a arătat anterior, relația de nedeterminare a lui Heisenberg consideră că o particulă elementară poate avea, pentru momente foarte scurte, un surplus enorm de energie.

De fapt, situația ar putea fi privită și statistic, în sensul că se presupune un ansamblu de particule ale căror energii pot să se concentreze pe diverse particule, printr-un fenomen de „fluctuație". Particula care la un moment dat posedă o mare energie, o are sub formă de „împrumut" de la ansamblul statistic din jur. Dacă timpul este suficient de scurt, energia (sau masa) poate fi atît de mare încît nu se poate preciza dacă este vorba de o singură particulă sau de cel puțin două particule ce însumează energia respectivă. Cu alte cuvinte, s-ar putea să existe o secvență în care o particulă devine, pentru un moment, „o pereche de particule"; însă nici o măsurătoare nu ar putea să constate că acest lucru se întîmplă sau nu. În ideea că procesul ar avea totuși loc, se spune că particula originală „fluctuează" în două particule, iar particula „suplimentară" este numită *particulă virtuală*.

Particulele virtuale. În lumea cuantică, particulele virtuale pot fi asociate oricăror particule reale, încărcate electric. De fapt, ele reprezintă o consecință a principiului de nedeterminare, aplicat la parametrii de timp și energie, adică la nedeterminarea care există între energia pe care o are un sistem cuantic și timpul la care are o anume energie.

De pildă, să considerăm ce se întîmplă atunci cînd se urmărește măsurarea energiei unui sistem. Ca în orice alte măsurători, sistemul poate fi observat folosind un anume fel de teste. În cazul cînd se urmărește cunoașterea energiei unui sistem, această observație necesită o anume perioadă de timp. Cel mai scurt timp ar fi cel necesar pentru ca elementul de testare să interacționeze cu sistemul. Astfel, am putea interpreta acest „timp scurt" necesar pentru efectuarea observației drept „nedeterminarea de timp", deoarece este evident că pentru acest scurt, oricît de scurt, interval de timp nu se poate spune nimic despre energia sistemului. Mai concret, dacă timpul necesar ca elementul de testare (instrumentul) să înregistreze o măsură a energiei sistemului este de 1 minut, valoarea aflată va fi comunicată ca fiind valoarea-rezultat. Dar în nici un caz nu se poate spune nimic

despre energia pe care a avut-o sistemul după 10 secunde sau după 50 secunde de la începutul testării... Astfel, valoarea aflată după un minut de testare nu este decît *valoarea medie a energiei sistemului*. Or, este posibil ca energia sistemului să sufere mari schimbări în acest minut de măsurare, putînd atinge atît valori maxime (pozitive), cît şi minime (negative) — egale în modul cu constanta lui Planck.

Cele de mai sus ilustrează faptul că nedeterminarea timpului de măsură atrage după sine nedeterminarea energiei sistemului. Iar această relaţie de nedeterminare duce la unul dintre cele mai interesante concepte din fizică — conceptul de particulă virtuală.

Dar energia pe care o poate avea o particulă nu poate fi oricît de mare; ea nu poate depăşi valoarea constantei lui Planck. Sau, prin prisma principiului de nedeterminare se mai poate spune că produsul dintre energie şi timpul de „împrumut" nu poate fi mai mare decît constanta lui Planck.

Întrucît energia „împrumutată" poate avea valori diverse, în limita menţionată, timpul în care fotonul de acţiune va exista diferă corespunzător. De pildă, dacă „jocul energiilor" duce la formarea unui foton din gama frecvenţelor de sute de kiloherţi, acesta va supravieţui circa 10^{-6} s, pe cînd în cazul în care apare un foton gama (cu enorma frecvenţă de ordinul milioanelor de milioane de kiloherţi), timpul de „împrumut" se reduce la 10^{-20}s.

Fotonii virtuali din jurul nucleului pot participa la interacţii cu alte particule încărcate electric, dar cu condiţia ca schimbul să dureze mai puţin decît timpul de „împrumut".

Un lucru deosebit de important: nu trebuie să se stabilească o identitate între *fotonii virtuali* şi *fotonii emişi* de atomi, atunci cînd electronii trec de la un nivel energetic superior la unul inferior. Aceştia din urmă sînt *fotoni reali* şi pot fi puşi în evidenţă, de pildă, în spectrul de lumină.

Privit sub un alt unghi, un electron este considerat că „pulsează radiaţie" din domeniul invizibilului, stare datorată sarcinii sale electrice. Pulsul de radiaţie este de fapt concretizat printr-un foton (virtual), care oricînd poate acţiona. Pulsaţiile nu se fac însă la întîmplare, ci se consideră că fotonul se află lîngă electron timp de o fracţiune foarte scurtă de timp, dintr-un număr de 137 de fracţiuni la fel de scurte. Numărul 137, inversul constantei structurii fine, reprezintă probabilitatea de apariţie a fotonului virtual de acţiune.

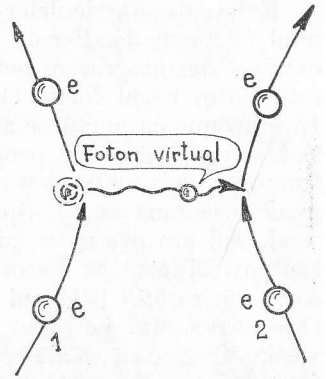


Fig. 17. Diagrama Feynman arată cum cei doi electroni, 1 şi 2, se apropie, iar fotonul virtual, purtător de forţă electromagnetică, acţionează asupra electronului vecin.

Atunci cînd are loc o interacţie între doi electroni, fotonii din jurul lor devin purtătorii forţei electrice. Ei acţionează traversînd spaţiul dintre cei doi electroni, devenind astfel „mijlocitorii" rapizi ai contactului.

În felul acesta a fost spulberată ipoteza că interacţiile dintre mărimile electrice s-ar datora unei forţe misterioase care acţionează la distanţă; interacţiile electrice s-au dovedit a fi de contact cu fotonii care apar, ca particule de radiaţie, în jurul sarcinii electrice.

Este interesantă asemănarea dintre schimbul de fotoni la nivelul electronilor şi schimbul de electroni la nivelul moleculelor în cazul reacţiilor chimice. Astfel, în timp ce la reacţiile chimice electronii pot fi detectaţi şi măsuraţi, adică sînt *reali*, fotonii care mijlocesc interacţiile electronilor nu pot fi detectaţi, fiind *virtuali*.

Desigur, la început fotonii virtuali erau socotiţi doar o speculaţie teoretică, privită cu scepticism. Dar după ce s-a constatat că ei explică perfect interacţiile electrice, modelul a fost acceptat şi constituie concepţia actuală asupra forţelor electrice.

Dorinţa fizicienilor de a găsi totdeauna cîte un model sau o reprezentare grafică a teoriilor s-a manifestat şi în domeniul interacţiilor. Astfel au fost introduse *diagramele Feynman*, care s-au dovedit utile în interpretarea forţelor electrice. De pildă, diagrama din figură arată cum doi electroni, 1 şi 2, se apropie, iar fotonul virtual purtător de forţă electrică acţionează asupra electronului vecin.

Chiar dacă diagramele Feynman sînt utile în interpretarea forţelor, tăria interacţiei este dată corect doar de teoria cuantică a cîmpului.

Practic, se apreciază că între doi electroni care interacţionează are loc un schimb de mai mulţi fotoni virtuali; cu cît sînt implicaţi mai mulţi fotoni, cu atît interacţia este mai puternică.

Existența particulelor virtuale a fost propusă, încă din anul 1930, de E. Fermi, care a elaborat o teorie prin care explică dezintegrarea beta prin analogie cu schimbul de fotoni din cazul forței electrice de atracție sau respingere. El a propus ca purtător al acestei forțe (o forță slabă) o particulă avînd aceleași proprietăți spațio-temporale ca și fotonul, pe care a numit-o *weakon* sau *foton slab* (în l. engleză, *weak* înseamnă *slab*). Spre deosebire de fotonul cu masă nulă, weakonul era presupus cu masă și sarcină electrică. Important este faptul că Fermi a semnalat existența unei *forțe slabe nucleare* în procesul de dezintegrare beta, forță despre care se va mai vorbi în secțiunile următoare. Iar căutarea weakonului avea să ducă la una dintre cele mai pasionante vînători ale fizicienilor.

Dar nici protonul nu a fost neglijat. Și pentru el au fost calculate particule virtuale. Din calcule a reieșit că o particulă virtuală a cărei masă este egală cu cea a protonului ar putea străbate 10^{-16}m, iar dacă masa este o fracțiune din cea a protonului ar putea străbate o distanță de cîteva ori mai mare. În acest caz se poate ajunge la situația că dintre două particule, una poate „fluctua" în ea însăși plus o particulă virtuală și, datorită faptului că particula virtuală (în funcție de masa sa) poate străbate o anume distanță în timpul existenței sale, particula virtuală ar putea fi absorbită de cea de a doua particulă. Sau, cu alte cuvinte, o particulă avînd o astfel de masă poate fi „schimbată" între doi protoni aflați la distanța de cîțiva fermi (un fermi este aproximativ diametrul unui nucleu mediu).-

În anul 1934, fizicianul H. Yukawa, de la Universitatea din Osaka (Japonia) și independent de el, fizicianul român Alexandru Proca, director de cercetări la Institutul H. Poincaré din Paris, au pus bazele studiilor asupra forțelor nucleare, preconizînd existența unei particule purtătoare de forță, responsabile pentru interacțiile proton-proton. Această particulă de schimb a fost numită *mezon* (*mezos* = intermediar, mijlociu) iar masa a fost aproximată la circa 1/9 din cea a protonului. În anul 1936, A. Proca a stabilit ecuațiile cîmpului mezonic vectorial, instrument important pentru dezvoltarea ulterioară a acestui domeniu de cercetare.

Existența mezonului a părut că este, de asemenea, o ipoteză fantastică. Avînd masă și fiind totodată particulă

Alexandru Proca

de schimb, rezulta că efectul schimbului ar fi o forță de atracție între protoni, dar mult mai mare decît forța de respingere electrică. Adică, prin postularea mezonilor intermediari se pune în evidență un nou tip de forță fundamentală — *forța tare nucleară*, care „ține strîns" nucleul atomic.

Întrucît atît protonii, cît și neutronii ar putea emite și absorbi mezoni, este ușor de înțeles rolul pe care l-ar avea neutronii în nucleu. Ei nu posedă sarcină electrică, așa încît nu contribuie la forțele electrice care tind să împrăștie nucleul; dar ei, prin forța tare nucleară, contribuie la „îngrămădirea" nucleonilor.

Teoria părea extrem de atrăgătoare, dar rămînea verificarea experimentală. Evenimentul a avut loc în anul 1938, cînd fizicianul C. Anderson a comunicat identificarea unei particule cu datele mezonului, într-o înregistrare fotografică a urmelor radiației cosmice cu ajutorul unei camere cu ceață. El a numit noua particulă *mezon-miu*, azi fiind în uzanță numele de *miuon*.

Entuziasmul a fost general, dar curînd avea să se constate că nu acesta era mezonul prezis de Yukawa și Proca. Miuonul avea să ocupe un alt loc în ierarhia particulelor subatomice, după cum se va vedea în secțiunile următoare.

Capitolul 7

RADIOACTIVITATEA ARTIFICIALĂ

Un fenomen descoperit de două ori?

Descoperirea radioactivității, în anul 1895, după cum era și de așteptat, a stîrnit un mare interes în lumea fizicienilor. Era un domeniu fantastic, înconjurat de enigme ce trebuiau dezlegate. Unul dintre cele mai „înverșunate" laboratoare de cercetare a fost cel al soților Curie, cărora le revine meritul de a fi descoperit poloniul și radiul, dar cu prețul unor mari sacrificii materiale și distrugerea sănătății.

La Paris era renumit Institutul Radiului, laborator care constituia un centru de atracție pentru tinerii cercetători, mai ales că lucrările erau conduse de Marie Curie. Printre acești tineri care efectuau stagii de specializare se afla și fiziciana română Ștefania Mărăcineanu (1882—1944). Între anii 1922—1924, fiziciana română a efectuat experiențe originale asupra unui fenomen nou: o bucată de plumb expusă un timp radiațiilor solare devenea radioactivă, emițînd radiații. Pentru completarea datelor necesare pregătirii tezei de doctorat a ajuns chiar să demonteze o serie din plăcile de plumb cu care era acoperit Observatorul astronomic din Paris... În teza sa de doctorat, cu titlul „Cercetări asupra constantei poloniului și asupra penetrației în metale", în 1924, identifică radioactivitatea plumbului iradiat, cea dintîi semnalare a acestui fenomen. Nu se știe ce s-a petrecut la Institutul Radiului, deoarece nu a fost popularizată această prioritate mondială, iar fenomenul a fost prezentat abia în 1934, printr-o comunicare făcută de fiica lui M. Curie, Irène Curie, și soțul ei, Frédéric Joliot.

Activitatea fizicienei Ștefania Mărăcineanu este menționată în diverse lucrări de specialitate ca „Handbuch der Experimental-Physik" de K.W. Kohlrausch, „Radioaktiwität" de S. Meyer și E. Schweindler ș.a.

Astfel că unul dintre fenomenele de o însemnătate deosebită pentru fizica nucleară a intrat în lumea științei abia la 10 februarie 1934, printr-o pagină din revista „Nature",

care începea astfel: „Acum cîteva luni noi am descoperit că unele elemente ușoare emit pozitroni sub acțiunea particulelor alfa. Ultimele noastre experimente au arătat un eveniment uimitor: dacă o placă de aluminiu este iradiată cu un preparat din poloniu, emisia de pozitroni nu încetează imediat ce este îndepărtat preparatul radioactiv"...

Concluzia comunicării era că în procesul de bombardare a aluminiului cu particule alfa a avut loc fenomenul de *transmutație artificială*, descoperit de Rutherford în anul 1919.

Transmutații. Experiența lui Rutherford a arătat că azotul bombardat cu particule alfa emite protoni. Dar, în acest caz, ce s-a întîmplat cu particulele alfa? Dar cu nucleul?

Verificările înregistrărilor făcute în camera cu ceață au confirmat evenimentul, precum și explicațiile lui Rutherford, că nucleele de azot absorb particule alfa și emit protoni, transformîndu-se într-un izotop al oxigenului. În concluzie, azotul s-a transformat în oxigen ca urmare a unei intervenții conduse de om, obținîndu-se astfel o *transmutație artificială*, de a transforma un element în alt element.

După aceste preliminarii, modalitățile de transmutație ale elementelor s-au extins enorm. În prezent se poate acționa asupra nucleelor atomice, provocînd transmutații, cu orice particulă care dispune de energie suficientă: particule alfa, protoni, deutroni, neutroni, electroni etc.

De ce s-a specificat „energie suficientă"? Bombardamentul nucleelor cu particule ce prezintă sarcină electrică suferă de un grav inconvenient. Pentru a putea ajunge la nucleu, particula trebuie să învingă bariera de potențial datorită sarcinii electrice a nucleului. Și această barieră este cu atît mai mare cu cît este mai mare sarcina electrică a nucleului, adică a numărului său atomic, și a particulei-proiectil. De aici o concluzie logică: pentru ca o particulă încărcată electric să poată ajunge la nucleu și să-l aducă în starea de a se dezintegra, ea trebuie să posede energie suficientă pentru a „străpunge" bariera ce înconjoară nucleul.

Așa se explică de ce primele reacții de dezintegrare a nucleelor au fost realizate prin străpungerea doar a nucleelor elementelor mai ușoare, cu un număr atomic mai mic decît 30. Limitarea mai era impusă și de faptul că energiaț particulelor, alfa, obținute de la un element radioactiv natural aveau energii relativ scăzute și nu puteau depăși barierele de potențial ale nucleelor mai grele .

În scurt timp, problema a fost transferată pe planșetele tehnicienilor. Obiectivul principal era construirea de instalații în care particu-

ele încărcate electric să poată fi accelerate, conferindu-le energii cît mai mari pentru a putea deveni proiectile eficiente în fața tuturor nucleelor cunoscute.

Astfel a apărut o foarte importantă ramură tehnică a fizicii nucleare, cea a construirii accceleratoarelor de particule. A început cu simple mașini electrostatice asociate unor mari capacitori capabili să asigure diferențe de potențial ridicate, și continuă în zilele noastre prin uriașe instalații ce se întind pe zeci de hectare... Performanțele acestor instalații vor fi prezentate în secțiunile următoare, cînd se va scoate în evidență rolul jucat de ele în schimbarea spectaculoasă a lumii microcosmosului.

Transmutațiile au devenit un nou centru de interes pentru cercetători, în special după ce au dispus de acceleratori de particule. Cockroft și Walton au fost primii fizicieni care au folosit în experiențele lor protoni de mare energie, cu care au bombardat nuclee de litiu. Experiențele au arătat că nucleul de litiu, după ce a absorbit un proton, se scindează în două fragmente, anume în două particule alfa. Calculul arată un bilanț echilibrat: suma numerelor atomice (litiul = 3, protonul = 1, alfa = 2) și respectiv a celor de masă (litiul = 7, protonul = 1, alfa = = 4) la începerea reacției (adică a particulelor „de intrare") este egală cu cea a rezultatelor reacției (adică a particulelor „de ieșire").

Procesul de scindare a nucleului, după o „provocare", mai este numit *dezintegrare nucleară*.

Dezintegrările nucleare pot fi diferite, chiar dacă componența reacției este aceeași. Astfel, dacă se bombardează deutroni (nuclee de izotopul 2 al hidrogenului — deuteriul) cu deutroni de mare energie, se pot obține fie un proton și un triton (nucleu al izotopului 3 al hidrogenului — tritiul), fie izotopul 3 al heliului plus un neutron.

Un alt tip de reacții nucleare a fost descoperit în 1934, de Chadwick și Goldhaber, care au bombardat nuclee de deuteriu cu radiații gama. Nucleele bombardate astfel absorb fotonii gama și, emițînd cîte un neutron, se transformă în nuclee de hidrogen. Radiațiile gama au fost obținute de la un izotop radioactiv al toriului.

Unele din transmutațiile obținute în laboratoare se bucură de o anume proprietate: nucleele obținute, ca rezultat al reacțiilor nucleare ce au avut loc, sînt stabile. Dar nu toate transmutațiile se comportă la fel. După cum s-a menționat anterior, soții Joliot-Curie, în 1934, au urmărit cum aluminiul bombardat cu particule alfa, provenind de la o sursă radioactivă, lasă în camera cu ceață urme de protoni și de pozitroni. Continuîndu-și observațiile, cei doi fizicieni

au constatat, *întîmplător*, că și după ce a fost îndepărtată sursa radioactivă, aluminiul continua să emită *pozitroni* timp de cîteva minute. Deci, particulele alfa lovind nucleele de aluminiu au dat naștere la alte nuclee instabile, care puteau avea o viață de cîteva minute, suferind apoi o nouă transformare în care emiteau pozitroni. Astfel a fost comunicată descoperirea *radioactivității artificiale*.

Din toate aceste experimente s-a ajuns la o concluzie importantă: produsul transmutațiilor nucleare nu este totdeauna stabil. Adică, în multe cazuri, rezultatul unei reacții nucleare poate fi un nucleu instabil, care nu există în stare naturală și care, mai devreme sau mai tîrziu, va suferi o nouă transformare, emițînd o particulă, pentru a deveni apoi un nucleu stabil. Comportarea este deci analoagă nucleelor radioactive naturale. Deci și legile de dezintegrare sînt aceleași, fie că este vorba de nuclee radioactive naturale, fie de nuclee radioactive artificiale.

Urmărită mai sistematic, radioactivitatea artificială prezintă două etape distincte. În prima, o particulă-proiectil lovește nucleul și duce la formarea unui nucleu transformat instabil. În a doua etapă, nucleul instabil emite o particulă, devenind nucleu stabil.

Noul domeniu a dus, bineînțeles, la o suită de cercetări, care au extins mult cunoștințele despre radioactivitatea artificială, asupra mecanismului de dezintegrare al diferitelor nuclee instabile. Important este faptul că în urma studiului asupra experimentelor făcute s-a confirmat importanța *timpului de înjumătățire* al unui număr oarecare de nuclee radioactive, care diferă de la un tip de nucleu la altul. În plus, s-a scos în evidență că pentru același tip de nuclee, timpul de înjumătățire este totdeauna același; or, această proprietate are o importanță deosebită, devenind un fel de „carte de vizită" a nucleelor respective, o constantă cu care pot fi identificate.

Nici cea de-a doua cale de obținere a transmutațiilor atomice, prin radiații electromagnetice de mare energie, nu a fost neglijată. Elementele bombardate cu radiații gama se dezintegrează emițînd neutroni. Fenomenul a fost numit *efect fotoelectric nuclear* sau *fotogenerare*. Dintre multe asemenea cazuri poate fi menționat unul dintre primele, realizat de fizicienii Bothe și Gentner. Prin bombardarea fosforului

cu fotoni gama, avînd o energie de 17 MeV, au obținut un izotop radioactiv al fosforului, în proces eliberîndu-se neutroni. Apoi izotopul radioactiv (instabil) se dezintegrează, respectînd mecanismul cunoscut — emițînd un pozitron —, cu timpul de înjumătățire de 131 secunde.

Cum în fizica lumii microcosmosului surprizele nu lipsesc, nici cercetările asupra radioactivității nu s-au abătut de la acest „obicei". Anume, contrar regulii amintite mai sus, că perioada de înjumătățire este o constantă a fiecărui nucleu instabil, curînd s-au observat abateri de la această regulă. De pildă, nucleul de brom, avînd masa atomică 80 (izotop radioactiv al bromului stabil) se dezintegrează fie cu o perioadă de înjumătățire de 18,5 minute, fie cu o perioadă de 4,54 ore! Adică lucrurile se petrec într-o astfel de manieră încît s-ar părea că bromul cu masa atomică 80, ar fi, în realitate, un amestec de două tipuri diverse de brom, care au același număr atomic și aceeași masă atomică și diferă doar prin proprietățile lor radioactive. Aceste nuclee au fost numite *izomere*, iar explicația este legată de legi importante ale fizicii nucleului. În prezent se cunosc multe cazuri de nuclee izomere, precum și proprietatea acestora de a fisiona spontan.

Fermi și neutronii-proiectil

O notă deosebită în cercetarea radioactivității artificiale a fost dată de E. Fermi, care a reușit să provoace fenomenul folosind nu particule cu sarcină electrică, așa cum se folosea obișnuit, ci neutroni. Dacă pînă atunci particulele-proiectil încărcate cu sarcină electrică puteau produce transmutații doar la nucleele elementelor ușoare, neutronii s-au dovedit a fi capabili să producă fenomenul la orice tip de nucleu. Este lesne de înțeles că acest lucru a fost posibil tocmai datorită lipsei de sarcină electrică a neutronului, care se poate apropia cu ușurință de orice nucleu.

Sursa de neutroni folosită de Fermi a constat dintr-un amestec de radon (radioactiv natural) și pulbere de beriliu, introduse într-un tub de sticlă lung de 1 cm. Ce se petrece în tubul de sticlă? Nucleul de beriliu, absorbind o particulă alfa emisă de radon, se transformă într-un nucleu de carbon, emițînd un neutron. Tocmai acești neutroni emiși de amestecul din tubul de sticlă erau „proiectilele" folosite de Fermi.

Bombardamentele cu neutroni au stîrnit un mare interes în laboratoare. Fermi și colaboratorii săi, în cursul numeroaselor lor experiențe, au stabilit, în anul 1934, că fenomenul de absorbție a unui neutron de nucleu și de dezintegrare a nucleului se face după una din cele trei scheme:

1 — nucleul bombardat absoarbe un neutron și emite un proton: reacția (n, p)

2 — nucleul absoarbe un neutron și emite o particulă alfa: reacția (n, α)

3 — nucleul absoarbe un neutron și emite fotoni gama: reacția (n, γ).

La aceste trei scheme descoperite de Fermi și colaboratorii săi poate fi adăugată cea de-a patra schemă, descoperită de fizicianul olandez Heyn, în 1936;

4 — nucleul bombardat absoarbe un neutron și emite doi neutroni: reacția $(n, 2n)$.

Experimentele grupului de fizicieni de la Roma, condus de E. Fermi, se remarcau prin insistența cu care studiau bombardarea cu neutroni a nucleelor atomice. Activitatea susținută a cercetătorilor a dus la una din descoperirile esențiale ale fenomenului care, ulterior, a constituit una din principalele verigi în controlul energiei atomice.

Iată „filmul" descoperirii. Bombardînd cu neutroni nucleele de argint, s-a observat că argintul radioactiv nu avea întotdeauna aceeași „activitate": uneori se dezintegrau 100 nuclee de argint pe minut, alteori doar 80. După observații succesive s-a ajuns la concluzia stranie că variația activității argintului depinde de obiectele cu care era înconjurată sursa de neutroni, adică de substanța care se găsea între sursa de neutroni și argint.

Evident, constatarea a devenit un stimulent „generos" pentru cercetări. Rezultatul? Activitatea radioactivă a argintului crește de circa 30 de ori dacă între surse de neutroni și nucleele-țintă se așeza un ecran din apă sau parafină. Întrucît ambele substanțe au ca element comun hidrogenul, este ușor de imaginat că lui i s-a atribuit cauza fenomenului. Dar cum se explică această „contribuție" a hidrogenului?

După cum s-a mai arătat masele neutronului și protonului (nucleul de hidrogen) au valori aproape egale. Neutronii emiși de sursă, înainte de a ajunge la nucleele de ar-

gint, lovesc protonii din substanța ecranului. După o primă ciocnire, un neutron își va continua drumul într-o direcție diferită și cu o viteză modificată. Are loc o nouă ciocnire cu un alt proton și lucrurile se petrec la fel ca mai înainte. Făcîndu-se calculul se constată că un neutron care trece printr-un bloc de parafină sau prin apă suferă un așa de mare număr de ciocniri, încît, în final, viteza sa este mult mai mică decît cea inițială.

Neutronii încetiniți prin această metodă au fost numiți *neutroni lenți*. După cum au arătat experiențele, neutronii lenți au proprietăți cu mult diferite de neutronii rapizi. Astfel, s-a ajuns la concluzia că neutronii lenți sînt mult mai eficienți în producerea elementelor radioactive, fiind deci mult mai ușoară capturarea lor de nuclee.

Care este energia neutronilor lenți? Un raționament simplu conduce la ideea că neutronii, ciocnindu-se succesiv cu protonii din substanța de „ecranare", vor continua să cedeze din energia lor cinetică, pînă cînd valoarea ei atinge nivele foarte scăzute. În prezent, neutronii au fost clasificați astfel, din punctul de vedere al energiei cinetice: termici (0,25 eV), lenți (0,25—1 eV), epitermici (1 eV-0,1 MeV) și rapizi (peste 0,1 MeV).

Atomii tuturor substanțelor, la temperaturi peste 0 K se află într-o continuă mișcare, numită agitație termică. În corpurile solide, mișcările atomilor consistă în oscilații în jurul unei poziții fixe, la care energia, la temperatura ambiantă (20°C) este de circa 40 eV. Atîta timp cît neutronii-proiectil au energia relativ mare, o dată cu fiecare ciocnire cu protonii pierd o fracțiune foarte mare din aceasta și, treptat, sînt încetiniți. Atunci cînd energia lor ajunge la același ordin de mărime cu cea a protonilor aflați în agitație termică, procesul de încetinire se oprește.

Acum se poate înțelege cum acționează un ecran de parafină așezat în jurul unei surse care emite continuu neutroni. Dacă neutronii au o energie inițială, de pildă, de 5 MeV, în fiecare moment, la ieșirea din stratul de parafină, vor fi prezenți neutroni avînd toate energiile posibile, de la 5 MeV pînă la energia corespunzătoare stării de agitație termică, evaluată la cîteva zecimi de electron-volt.

Încetinirea neutronilor se poate obține și cu alte substanțe, ca beriliul și carbonul, dar acestea sînt mai puțin

eficiente. Substanțele folosite la încetinirea neutronilor se numesc *moderatoare*.

Surprizele neutronilor

Capturarea neutronilor de nucleu, fenomen care părea aproape elucidat, mai prezenta încă semne de întrebare. Numeroasele experiențe, în condiții impuse, avînd grade de finețe din ce în ce mai mari, au scos la iveală o nouă situație ce nu putea fi explicată în limitele cunoscute. Concluzia că neutronii lenți sînt absorbiți „cu o foame mai mare" de nuclee decît ceilalți neutroni s-a dovedit a fi oarecum pripită. Experiențe făcute cu nuclee de aur au arătat într-adevăr o aviditate mai mare pentru capturarea neutronilor termici (0,1—0,2 eV), dar au scos în evidență o foame cu mult mai mare pentru neutroni avînd energia cuprinsă între 4,87—5,05 eV. Cu alte cuvinte, nucleele de aur sînt extrem de sensibile la neutroni avînd energiile cuprinse într-un interval relativ mic (4,87—5,05 vV), în timp ce pentru neutronii de alte energii, în afara acestui interval, prezintă o sensibilitate mediocră. Fenomenul a fost observat și în cazul reacțiilor (n, γ), care au loc numai în cazul în care neutronii capturați se află la energii într-un interval relativ mic de valori.

Cum era și firesc, s-a făcut imediat analogie cu absorbția luminii de un gaz, pentru anumite frecvențe de radiații. De pildă, dacă printr-un mediu conținînd vapori de sodiu trece o rază de lumină, conținînd radiații de toate frecvențele posibile, vaporii absorb intens doar radiațiile de unele frecvențe bine determinate, corespunzătoare unui anume nivel de energie (din zona de culoare galbenă a spectrului). În cazul neutronilor, fenomenul este asemănător; dintre neutronii de toate energiile posibile, sînt absorbiți doar aceia ale căror energii se află într-un anume interval, numit nivel de absorbție a neutronilor, specific nucleului respectiv.

Foarte stranie a părut în 1936 și descoperirea că pentru un anume tip de nucleu existau mai multe nivele de absorbție a neutronilor, distanțate cu valori de cîteva zecimi de electron-volți. Avalanșa de descoperiri devansa deseori cu mult posibilitățile de interpretare...

În încercările de explicații, bazate în continuare pe analogia cu modele concrete, inepuizabilul Bohr a reușit să învingă dificultățile de interpretare folosind modelul său de

nucleu-picătură. Cu acest prilej el a lansat o idee ce avea să se dovedească utilă în dezvoltarea ulterioară a fizicii nucleului atomic. El a apreciat că în urma bombardamentului nucleului cu neutroni, un efect imediat este creşterea energiei tuturor nucleonilor constituenţi. În acest caz se spune că nucleul se află într-o *stare excitată*. Iar un nucleu excitat trece din nou în stare fundamentală (se desexcită) prin una din cele patru tipuri de reacţii amintite: *(n, p)*, *(n, α)*, *(n, γ)* şi *(n, 2n)*.

Cu modelul său, Bohr a dat şi o explicaţie a existenţei nivelelor de absorbţie a neutronilor, dar lucrurile aveau să se lămurească abia în ultimii ani, pe baza fenomenelor de rezonanţă a nucleelor atomice şi cea a structurii interne a nucleonilor.

Radioactivitatea artificială avea să mai rezerve însă unele surprize cercetătorilor. În studiul sistematic al radioactivităţii induse de neutroni, Fermi şi colaboratorii săi au observat, în 1934, că şi uraniul, care este prin natura sa radioactiv, atunci cînd este supus acţiunii neutronilor dă naştere la numeroase „corpuri" noi, care emit particule beta. Atenţia cercetătorilor s-a fixat în special asupra a două din aceste „corpuri", care aveau timpul de înjumătăţire de 15 minute şi, respectiv, 100 minute.

Verificarea sistematică a proprietăţilor chimice a celor două „corpuri" a dus la o concluzie stupefiantă: ele nu erau izotopi ai nici unui element vecin uraniului, adică ai elementelor cu numerele atomice cuprinse între 85 şi 92. Astfel s-a emis ipoteza că era vorba de izotopii unui nou element, cu numărul atomic 93, care nu există în natură. Adică, nucleul de uraniu, prin capturarea unui neutron, dă naştere unui izotop instabil, care prin emisiunea unui electron se transformă apoi în nucleul unui element cu numărul atomic 93.

Rezultatele au fost confirmate de Lise Meitner, Otto Hahn precum şi de soţii Joliot-Curie, iar cercetările ulterioare, pe măsură ce se încerca individualizarea naturii chimice a corpurilor responsabile de numeroase activităţi produse de bombardarea uraniului cu neutroni, au condus la situaţii de mare complexitate, dificile de rezolvat mai ales pentru că nu au fost observate la alte elemente.

De acum cercetările trebuiau să treacă pe un plan de mare rafinament, lucru ce se putea realiza numai prin perfecţionarea unor tehnici chimice. Acestor cercetări li s-au dedicat Otto Hahn şi F. Strassmann. În anul 1939, cei doi cercetători, deşi uimiţi şi nesiguri din cauza noutăţii rezultatelor, au comunicat descoperirea lor. Ei au arătat că după o lungă şi delicată serie de experienţe chimice trebuie să admită concluzia că unul din corpurile radioactive care se formează prin bombardarea uraniului cu neutroni nu era un izotop al radiului ($Z=90$), aşa cum se credea, ci era un izotop al bariului ($Z=56$).

Pentru un nespecialist rezultatul nu pare să spună nimic, dar cercetătorii din domeniul fizicii nucleare s-au găsit în

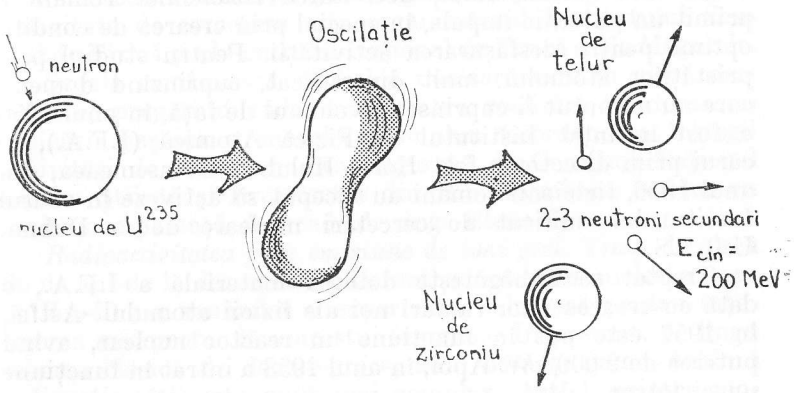


Fig. 18. Fisiunea nucleului de uraniu-235.

faţa unui proces *complet nou*, pe care l-au numit *fisiune*. Astfel, prin fisiune de acum înainte se înţelege fenomenul prin care nucleul de uraniu lovit de un neutron se „sparge" în două părţi *aproape egale*, consistînd din nucleele a doi atomi avînd numărul atomic situat în partea centrală a sistemului periodic al elementelor.

În plus, pentru a da o imagine a complexităţii fenomenului, este suficient să se arate că s-a constatat experimental că uraniul prin fisiune dă naştere la circa 35 de tipuri de nuclee de elemente, distribuite în zona centrală a sistemului periodic, şi că pînă în prezent au fost identificaţi peste 160 de izotopi radioactivi ai acestor elemente!

Pe de altă parte s-a constatat că uraniul supus bombardamentului cu neutroni nu numai că poate fisiona, dar poate să formeze elemente noi, cu numere atomice mai mari decît 92 (transuraniene): neptuniul (93), plutoniul (94), americiul (95)..., mendeleeviul (101)...

Nu este lipsit de interes să se știe că în afară de elemente transuraniene, în procesul de bombardare a uraniului cu neutroni au mai fost obținute cîteva elemente din zona centrală a sistemului periodic, care nu există în natură deoarece nu au decît forma instabilă: tehnețiul (43), astatiul (85), prometiul (61) și franciul (87).

În anii socialismului, activitatea fizicienilor români a primit un puternic impuls, în special prin crearea de condiții optime pentru desfășurarea activității. Pentru studiul proprietăților atomului, mult diversificat, cuprinzînd domenii care nu au putut fi cuprinse în volumul de față, în anul 1956 a fost înființat Institutul de Fizică Atomică (I.F.A.), al cărui prim director a fost Horia Hulubei. De asemenea, din anul 1956, fizicienii români au început să activeze în cadrul Institutului unificat de cercetări nucleare de la Dubna, U.R.S.S.

Treptat se îmbogățește dotarea materială a I.F.A., o dată cu crearea unor ramuri noi ale fizicii atomului. Astfel, în 1957 este pus în funcțiune un reactor nuclear, avînd puterea de 2 000 kW. Apoi, în anul 1958 a intrat în funcțiune un ciclotron.

Prin efortul industriei naționale, în anul 1959 este pus în funcțiune betatronul românesc, iar pentru accelerarea particulelor încărcate, în 1972 este pus în funcțiune un accelerator tip tandem, de 15 MeV.

Pentru acoperirea noilor ramuri de cercetare, în anul 1974 a fost creat Centrul Național de Fizică (C.N.F.), care prin Institutul Central de Fizică (ICEFIZ) și instituțiile sale de învățămînt asigură acestei ramuri posibilitatea îndeplinirii rolului multilateral ce îi revine pentru a face legătura cercetării cu învățămîntul și producția. Pe această linie se înscriu eforturile institutelor specializate din cadrul ICEFIZ, respectiv Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară (I.F.I.N.) și Institutul de Reactori Nucleari Energetici (I.R.N.E.), care produc și pun la dispoziția beneficiarilor izotopi radioactivi, compuși marcați, precum și instalațiile complexe de

măsură și detectare a urmelor radioactive. În acest cadru, pentru producția de radioizotopi, în anul 1976 a fost înființat Laboratorul de Medicină Nucleară.

Pentru punerea în aplicare a planului de cercetare în domeniul ionilor grei, în anul 1983 a fost instalat și pus în funcțiune un sistem de postaccelerare cu radiofrecvență.

Bucurîndu-se de condițiile dezvoltării studiului atomului în perioada actuală, un mare număr de fizicieni români activează în cadrul instituțiilor naționale, atît pe plan teoretic, cît și aplicativ. Dintre aceștia, acad. prof. Ioan Ursu (n. 1928), întemeietorul școlii românești de rezonanțe paramagnetice și descoperitor al efectului îmbogățirii izotopice prin metoda rezonanței paramagnetice, pe lîngă o bogată activitate de cercetare este organizatorul Institutului Central de Fizică și al Centrului Național de Fizică de la Măgurele.

Școala românească de fizică nucleară este în plină dezvoltare, pregătind cadre noi pentru realizări în domeniul aplicării pașnice a energiei atomului. Coordonarea întregii activități de cercetare este asigurată de Consiliul Național pentru Știință și Învățămînt din R.S. România, condus cu înaltă competență de acad. dr. ing. Elena Ceaușescu.

Radioactivitatea prin emisiune de ioni grei. Timp de circa 20 de ani de la descoperirea fisiunii spontane a nucleelor care au $Z>40$ s-a acumulat o experiență valoroasă pentru înțelegerea mai profundă a acestui fenomen. În prezent, pe lîngă schema clasică de dezintegrare, alfa, beta și gama, tabloul radioactivității este mult mai complex. Astfel, printre modurile de dezintegrare nucleară, pe lîngă fisiunea spontană (descoperită în 1940) mai pot fi amintite radioactivitatea protonică și cea neutrinică. Apoi, există fisiunea spontană a stărilor izomere precum și o schemă destul de mare pentru dezintegrările beta, care pe lîngă fisiunea spontană mai prezintă radioactivitatea alfa, protonică (simplă și dublă), neutronică (simplă, dublă și triplă). De asemenea, în dezintegrarea beta mai întîlnim și dezintegrarea prin tritiu și este prezisă cea prin izotopul 3 al heliului.

În general era cunoscut faptul că particulele și fragmentele în procesele de fisiune, din punctul de vedere al distribuției maselor, ocupă locurile $A=4$ și A mai mare de 60.

După cum rezultă din publicația „Revue roumaine de physique", nr. 3/1985, un colectiv de cercetători ai Institutului de fizică și inginerie nucleară (IFIN) din București,

format din D.N. Poenaru, M. Ivaşcu, A. Săndulescu (cercetător la Institutul de cercetări nucleare de la Dubna — U.R.S.S.), în colaborare cu W. Greiner, de la Institutul de fizică teoretică din Frankfurt/Main — R.F.G., au efectuat cu succes o serie de lucrări prin care se răspunde la întrebarea: Nu există, oare, şi alte moduri de dezintegrare, care să completeze spaţiul dintre $A=4$ şi $A=60$?

Studiile asupra stabilităţii nucleelor faţă de astfel de dezintegrare, cuprinse între fisiune şi dezintegrarea alfa, au fost făcute cunoscut prin comunicări încă din anul 1979. Astfel, se făcea predicţia unor noi tipuri de dezintegrare, anume dezintegrarea nucleelor cu emitere de ioni grei, începînd de la izotopul 5 al heliului, pînă la izotopii 45—51 ai calciului.

Lucrările cercetătorilor români au fost strălucit confirmate de cercetătorii Rose şi Jones, de la Universitatea din Oxford, care, în 1984, au descoperit izotopul 14 al carbonului în radioactivitatea radiului, experiment confirmat ulterior în laboratoarele din U.R.S.S., Franţa, S.U.A. şi Elveţia. Au urmat apoi comunicări privind alte dezintegrări conţinînd izotopi ai elementelor cuprinse în intervalul anunţat.

Noua descoperire completează astfel lista deschisă de Becquerel în 1896, cu dezintegrările alfa, beta şi gama, continuată în 1940 cu fisiunea spontană şi în anii 1960—1982 cu dezintegrarea protonică şi neutronică. Aparatul teoretic stabilit de cercetătorii români reprezintă în prezent un ghid pentru experimentatori, permiţînd o mai bună cunoaştere a acestor fenomene.

Capitolul 8

ACCELERATOARE

Problema energiilor mari

O dată cu pătrunderea în lumea microcosmosului, cercetătorii au avut de întîmpinat o situaţie cu totul neobişnuită. Dacă în lumea macroscopică, multe din informaţiile asupra structurii obiectelor erau obţinute direct prin observaţii cu ochiul liber, explorarea structurii intime a materiei nu se putea face nici cu cele mai puternice microscoape. Ochiul nu poate distinge obiecte mai mici de 6—7 miimi de milimetru, iar microscoapele, nu pot permite observarea dimensiunilor mai mici de 0,5 miimi de milimetru, adică detalii de circa 5 000 de ori mai mari decît diametrul unui atom şi de 500 de milioane de ori mai mari decît diametrul unui nucleu atomic...

Pentru studierea particulelor subnucleare, pentru investigarea proprietăţilor forţelor nucleare, metodele care se folosesc şi în prezent constau în principal din procese de ciocnire, prin bombardarea nucleelor cu particule dotate cu energii mari, pentru a putea pătrunde nucleele atomice. În felul acesta pot fi produse fenomene care pun la dispoziţia cercetătorilor date ce nu pot fi obţinute altfel. Cu alte cuvinte, studiind modalităţile în care are loc o interacţie, în urma ciocnirii, se pot determina caracteristicile corpurilor care au luat parte, precum şi a forţelor care intervin.

Energiile care se imprimă particulelor-proiectil sînt diferenţiate. Energia necesară pentru a „pătrunde" în dimensiunea de 10^{-10} m este de 0,002 MeV, dar pentru a ajunge la nucleu (10^{-14} m) este nevoie de o energie de 10 000 de ori mai mare (20 MeV). În ce priveşte pătrunderea în intimitatea nucleului, la dimensiuni de 10^{-16} m, este nevoie de o energie de 2 000 MeV (adică 2 GeV), iar pentru a ajunge în „interiorul" nucleonilor (10^{-18} m) este nevoie de energii de peste 200 GeV.

Desigur, pentru a putea efectua experienţe în lumea subatomică sînt necesare instalaţii în care să fie produse

particule-proiectil, apoi aceste particule să fie organizate în fascicule cu energii mari (adică să fie accelerate) și, în fine, să aibă o posibilitate de a pune în evidență rezultatele interacțiilor (detectoare de particule). Aceste instalații, numite *acceleratoare*, au însoțit cu mult succes pe fizicieni în cercetările lor, rămînînd și în prezent principalul instrument de lucru în lumea microcosmosului.

Astfel a apărut o nouă ramură a fizicii nucleare, cea a acceleratoarelor, în care tehnicienii, pentru a asigura un singur deziderat principal — fascicule de energii din ce în ce mai mari —, au avut (și mai au încă) de învins obstacole deosebite.

Particulele care sînt accelerate în aceste instalații pot fi, după caz: electroni pozitroni, protoni, antiprotoni, deutoni, precum și nuclee ale unor elemente ușoare sau medii. Totdeauna însă este vorba de particule ce posedă sarcini electrice, asupra cărora pot acționa oportun forțe electrice și magnetice, astfel încît să le aducă la un nivel energetic ridicat. Neutronii, în schimb, sînt totdeauna produși fie prin intermediul unor anumite reacții nucleare, fie prin bombardarea unor nuclee special alese, cu proiectile convenabile.

Energiile la care s-a ajuns în zilele noastre, cu acceleratoarele moderne, sînt de ordinul zecilor și sutelor de miliarde de electron-volți (al gigaelectron-volților, 1 GeV = un miliard de electron-volți). De la instalațiile simple de accelerare, care puteau fi așezate pe o masă de laborator, s-a ajuns în zilele noastre la instalații complexe uriașe, extrem de costisitoare, care se întind pe zeci de hectare.

În instalațiile obișnuite ale laboratoarelor de cercetare se ating, în prezent, energii de ordinul milioanelor de electron-volți. De pildă, în instalația de accelerare (ciclotron) de la Institutul de Fizică și Inginerie Nucleară din București, pus în funcțiune în 1958, se obțin protoni cu energii de 12 MeV și particule alfa cu energii de pînă la 25 MeV.

Dar există complexe mari de cercetare (CERN — Elveția, Dubna — U.R.S.S., Batavia — S.U.A. etc.) în care energiile obținute în acceleratoare sînt obișnuit de ordinul gigaelectron-volților. În prezent, performanțele maxime cu care se lucrează sînt de 20 GeV pentru acceleratoarele de electroni și pozitroni și de 540 GeV pentru protoni și antiprotoni.

La astfel de energii mari, vitezele particulelor accelerate nu diferă mult de viteza luminii. De aceea, pentru proiectarea instalațiilor de acest tip nu mai este posibil să se țină cont de legile mecanicii clasice, ci se apelează la mecanica relativistă. Se poate chiar spune că buna funcționare a acceleratoarelor constituie o bună dovadă a valabilității teoriei relativității care, astfel, pentru ingineria nucleară devine o disciplină de bază.

Criteriul cel mai simplu pentru a putea spune dacă o particulă are o anume energie — asemenea după cum pentru a-i studia mișcarea e necesar să se apeleze fie la mecanica clasică, fie la cea relativistă — consistă în confruntarea energiei sale cinetice (sau de mișcare), cu energia sa de repaus (m_0c^2), adică cu energia corespunzătoare masei sale măsurată în sistemul de referință în care particula este în repaus. Ori de cîte ori energia cinetică este mult inferioară energiei de repaus se poate face apel la mecanica clasică. Însă atunci cînd valoarea energiei cinetice este de același ordin de mărime cu cea a energiei de repaus, comportarea particulei se îndepărtează de la legile mecanicii clasice, căpătînd aspecte relativiste. Dar dacă energia cinetică a particulei este mult mai mare decît valoarea m_0c^2, se spune că se află într-o stare ultrarelativistă. În acest caz, particula are o viteză apropiată de cea a luminii; o creștere în continuare a energiei sale cinetice nu duce la o creștere a vitezei sale, ci la o creștere a masei.

O orientare în astfel de mărimi se poate face ușor considerînd valorile energiei de repaus (m_0c^2) ale cîtorva particule. De pildă, electronul are 0,5 MeV, protonul — 1 GeV, deutonul — 2 GeV, particula alfa — 4 GeV.

Deci un electron căruia i s-a asociat o energie de 10 MeV este deja ultrarelativistic, adică are aproape viteza luminii, c. Dar pentru ca un proton să fie adus în aceleași condiții este necesar să i se asocieze o energie de 20 GeV!

Cum se asigură „aprovizionarea" acceleratoarelor cu particule-proiectil? Evident, pentru a asigura producerea unor fascicule de particule accelerate, este necesar să existe o sursă de alimentare continuă de electroni, pozitroni, protoni etc. Dacă este vorba de electroni, problema este mai simplă. Este suficient să fie folosite filamentele metalice incandescente, similare celor folosite, de pildă, în tuburile cinescop ale televizoarelor. În cazul protonilor sau a altor nuclee

ușoare, sursa cea mai simplă poate fi constituită dintr-un tub de descărcare în gaze, de tipul celui folosit cu ani în urmă pentru studiul razelor canal. Dacă în tub este introdus hidrogen, razele canal vor fi constituite din protoni care, practic, pot fi introduși în accelerator.

O clasificare simplă

Acceleratoarele de particule, într-o posibilă clasificare se împart în două mari categorii: cu tensiune de accelerare constantă și cu tensiune de accelerare variabilă. Dacă acceleratoarele cu tensiune constantă sînt reprezentate printr-un singur tip — acceleratorul liniar, cele cu tensiune variabilă sînt prezentate în mai multe tipuri constructive: betatronul, ciclotronul, sincrotonul, ciclotronul modulat în frecvență, protosincrotonul, superprotosincrotonul, tevatronul etc.

Acceleratorul liniar cu tensiune constantă a fost pentru prima dată utilizat de cercetătorii Cockroft și Walton, pentru a produce un fascicul de protoni de circa 1 MeV. El consistă dintr-un tub de material izolator în care sînt montați mai mulți electrozi de formă cilindrică, așezați, succesiv, în linie. Cu ajutorul unui sistem potrivit de pompe, în interiorul tubului se face vid.

În cazul că tubul este destinat accelerării unor particule pozitive (de exemplu protoni), tensiunile aplicate electrozilor sînt, de obicei constante, crescătoare și pozitive față de țintă, care reprezintă materialul ce urmează să fie bombardat. Protonii emiși de sursă intră în tubul accelerator și, sub acțiunea cîmpului existent între perechile succesive de electrozi, vor fi accelerați și vor ajunge la țintă cu o energie cinetică, măsurată în electron-volți, echivalentă cu diferența de potențial (în volți) aplicată extremităților tubului.

Acceleratoarele de acest tip permit doar atingerea unor energii relativ joase, sub 2 MeV. O soluție care s-ar impune logic pentru obținerea unor energii mai mari — mărirea diferenței de potențial dintre extremități — nu poate fi aplicată deoarece ridică mari probleme în izolarea diferitelor părți ale tubului și crește pericolul descărcărilor electrice dintre părțile exterioare tubului.

Inconvenientele menționate au dus la studierea altor tipuri de acceleratoare, pentru a atinge valori mai înalte ale

energiei particulelor-proiectil și anume *acceleratoarele cu tensiune variabilă*. În aceste instalații liniare, numite și *linac*, pentru a atinge energii mai înalte este necesar ca particulele să fie accelerate în etaje, aplicîndu-le succesiv mici impulsuri, în loc de un singur impuls mare.

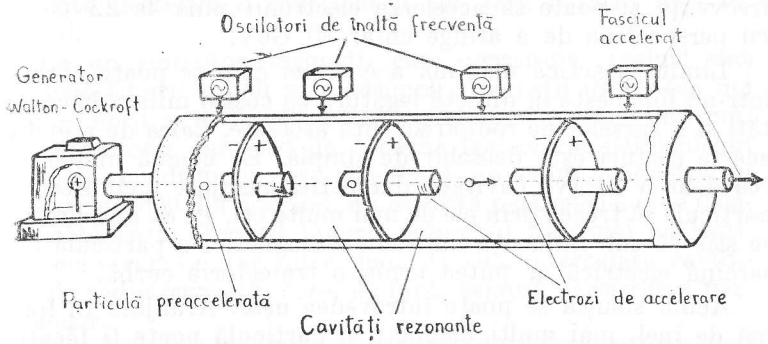


Fig. 19. Acceleratorul linear (linac) cu unde staționare este constituit dintr-o succesiune de tuburi izolante, separate prin intervale între care se exercită un cîmp electric alternativ. Fiecare particulă emisă trece prin axa primului tub, apoi, după ce iese, este supusă unui cîmp electric. Cîmpul electric se inversează cînd particula este în interiorul tubului. El este astfel reglat încît particula să fie din nou accelerată atunci cînd iese din tub. Deoarece frecvența oscilațiilor cîmpului este fixă, iar particula este accelerată, al doilea tub trebu ie să fie mai lung decît primul, pentru a putea fi din nou accelerată la ieșire etc. A fost construit la Stanford în 1932, iar peste 40 de ani a permis descoperirea particulei psi.

Cea mai bună cale de aranjare în vederea unei accelerări gradate consistă în înșiruirea succesivă a mai multor etaje mici de accelerare, într-un tub izolator vidat. În loc să se aplice electrozilor din fiecare etaj o tensiune înaltă constantă, cu ajutorul unui oscilator legat la fiecare set de electrozi, între aceștia se creează un cîmp electric alternativ, formîndu-se structuri care se numesc *cavități de radiofrecvență*.

Oscilatorii cavităților succesive sînt astfel sincronizați încît cîmpul electric este totdeauna polarizat corect pentru a asigura accelerarea particulelor. De fapt, se poate consi-

dera că o undă electromagnetică trece continuu prin tubul vidat, iar particulele „călăresc" unda electrică aidoma unui sportiv la surf, care totdeauna caută creasta unui val.

În prezent este în funcțiune un singur accelerator *linac*, la Universitatea Stanford din S.U.A. Completat în 1961, are o lungime de peste 3 km, conține 82 560 cavități de radiofrecvență și poate să accelerze electronii pînă la 22 GeV, cu perspectiva de a atinge chiar 30 GeV.

Limita practică maximă a energiei care se poate obține într-un linac este în directă legătură cu costul miilor de cavități și a surselor de radiofrecvență asociate. Calea de a evita aceste costuri este deosebit de simplă. Ea constă în folosirea doar a cîtorva cavități, dar astfel aranjate încît fiecare particulă să treacă prin ele de mai multe ori. Pe de altă parte, se știe că sub influența unui cîmp magnetic, o particulă cu sarcină electrică ar putea urma o traiectorie curbă.

Acum soluția se poate întrevedea ușor. Aranjînd în formă de inel, mai mulți magneți, o particulă poate fi făcută să urmeze o orbită circulară, sau orice altă curbă închisă.

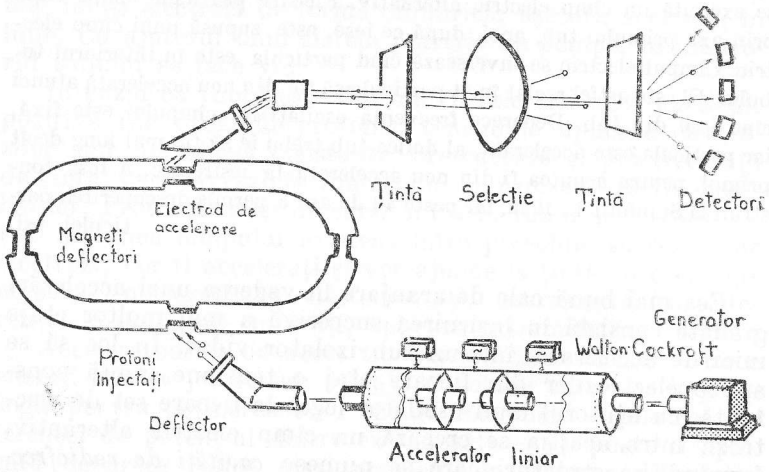


Fig. 20. Sincrotronul. Protonii accelerați lovesc țintele fixe, iar aceste coliziuni generează noi fascicule de particule, care apoi sînt trecute printr-un sistem de selecție. Fasciculele secundare ajung la detectori, unde sînt identificate.

Un fascicul de particule poate să circule prin acest inel de mai multe milioane de ori, trecînd prin cavitățile de radiofrecvență și cîștigînd în energie cu fiecare rotație. Un accelerator construit pe acest principiu se numește *sincroton*.

Toate marile acceleratoare moderne existente sau în proiect sînt de tipul sincrotronului. De aceea, este utilă o succintă descriere a funcționării lor, fără a intra însă în detalii.

La un sincroton magneții care constituie „inelul" sînt de două tipuri: dipoli și cuadrupoli. Magneții dipoli (cu doi poli — nord și sud), generează un cîmp magnetic uniform; ei „îndeplinesc sarcina" de a curba traiectoria particulelor. Magneții cuadrupoli, care generează un cîmp magnetic cu doi poli nord și doi poli sud, nu deflectă particulele, ci le focalizează într-un fascicul îngust, acționînd întocmai ca lentilele convergente. Iar între magneți sînt intercalate cavitățile de radiofrecvență, care, de fapt, asigură accelerarea particulelor.

Instalația mai trebuie să posede, de asemenea, magneți și electrozi speciali pentru „injectarea" particulelor în inel și pentru extragerea lor atunci cînd au atins energiile dorite.

Sincrotronul lucrează în cicluri. Atunci cînd un nor de particule este injectat în instalație, cîmpurile magnetice sînt astfel potrivite încît particulele urmează foarte precis curbura tubului vidat. Cu cît energia particulelor crește după fiecare rotire, intensitatea cîmpului magnetic de deflexie trebuie de asemenea ușor mărită.

Iar atunci cînd fasciculul de particule atinge valoarea maximă, el este extras; ca urmare cîmpul magnetic va fi adus din nou la nivelul inițial, fiind pregătit pentru a primi un nou „nor" de particule.

Acceleratorul este numit sincrotron, deoarece particulele își sincronizează automat mișcarea o dată cu creșterea intensității cîmpului magnetic și creșterea frecvenței tensiunii de accelerare.

Dar cele mai înalte energii nu sînt obținute cu o singură instalație, ci cu mai multe, aliniate în serie. Fiecare din acestea ridică energia particulelor cu factorul 10 sau chiar 100, apoi transferă fasciculul acceleratorului următor. În multe „complexe" de accelerare, tipuri mai vechi de acceleratori servesc la injectarea particulelor sau ca etaje preliminare pentru instalațiile mai puternice.

Într-un accelerator de protoni, de pildă, primul etaj este de cele mai multe ori un dispozitiv ce datează din 1928 — generatorul Cockroft-Walton. El constată dintr-un transformator și redresor, care generează o diferență de potențial de circa un milion de volți între un electrod interior și corpul exterior al dispozitivului. Protonii, obținuți prin ionizarea atomilor de hidrogen, sînt degajați de electrodul interior; cînd se extrag printr-un orificiu al corpului exterior, protonii au deja o energie de circa 1 MeV.

Următorul etaj este, de obicei, un *linac*, care poate ridica energia fiecărui proton între 50—200 MeV. Din linac, protonii pot fi injectați într-un sincroton, care ar putea fi ultima verigă a lanțului, ori poate servi, la rîndul său, să „propulseze" energia protonilor la cote mai înalte, pentru a fi apoi injectate într-un sincrotron mai mare, sau într-un „inel de stocare".

Pentru o mai bună reprezentare a ceea ce reprezintă în zilele noastre „laboratorul" cercetătorilor din domeniul fizicii nucleare, poate fi luat exemplul laboratorului ce poartă numele lui E. Fermi, de lîngă Chicago (S.U.A.) — *Fermilab*. Sistemul de acceleratoare de aici are drept prim etaj un generator de tipul Cockroft-Walton, care accelerează protonii pînă la 0,75 MeV, urmat de un linac (200 MeV) și un sincroton de propulsare (8 GeV) înainte ca fasciculul de protoni să fie injectat în sincrotronul principal (inelul de stocare).

Sincrotronul principal de la *Fermilab*, montat într-un tunel, are circumferința de 6,3 km, este alcătuit din 774 magneți de deflexie, fiecare lung de circa 6 m și 180 magneți mici de focalizare. O serie de cavități de radiofrecvență adaugă cîte 2,8 MeV energiei protonilor la fiecare rotire. Pentru a ajunge de la 8 GeV la 400 GeV este deci nevoie ca protonii să efectueze 140 000 de rotații, pe care le realizează în ...3 secunde!

Controlul acestor evenimente, care se modifică cu mare repeziciune, se face cu ajutorul a trei mari calculatoare, asistate de cîteva calculatoare-satelit mai mici.

Dar nici acest mare sincrotron nu va rămîne „solist" la *Fermilab*, ci doar un membru al ansamblului, deoarece construirea unui nou inel de stocare, sub cel existent, cu o altă serie de magneți și cavități de radiofrecvență, vor face să fie două acceleratoare într-un singur tunel. După ce fasciculul de protoni va atinge energia de circa 150 GeV în sincrotronul acum „principal", vor fi transferați inelului „de dedesubt", pentru o accelerare suplimentară.

La construcția noului inel au fost folosiți magneți supraconductori, cu care se pot realiza cîmpuri magnetice de două ori mai intense decît cu magneții obișnuiți. Astfel, energia maximă a acceleratorului este dublată la 1 TeV (1 TeV= $= 10^{12}$ eV).

Pentru a marca această piatră de hotar a tehnicii nucleare, noul accelerator a fost numit *tevatron*.

Cît de mare este 1 TeV? Dacă se consideră că un proton are această energie, văzută prin ochiul observatorului lumii noastre obișnuite, ea reprezintă aproximativ energia cinetică a unui ...țînțar în zbor. Dar la întreaga sa capacitate, tevatronul va accelera $5 \cdot 10^{13}$ protoni deodată, care vor da întregului fascicul energia de 8 milioane de jouli. Aceasta poate fi comparată cu energia unui obuz de tun, de 50 kg.

În cazul în care fasciculul de protoni va scăpa de sub control, ar putea topi pereții incintei vidate în care se mișcă și să distrugă magneții din jur. Evident, astfel de accidente trebuie evitate cu multă grijă.

Inelele de stocare — o perfecționare remarcabilă

Dar la ce servesc fasciculele de particule accelerate la aceste colosale energii? Ele reprezintă principalul mod de a primi informații asupra particulelor subatomice și asupra forțelor fundamentale care guvernează natura.

Atunci cînd particulele accelerate într-un sincrotron ating nivelul maxim de energie, ele sînt scoase de pe orbita lor de un magnet special și deviate sub forma unui fascicul extern. Eventual pot lovi o țintă, iar interacțiile dintre protoni și țintă pot fi studiate direct. Ori, din particulele secundare ce se obțin în urma interacțiilor, prin triere pot fi create fascicule secundare de anumite particule ce nu pot fi obținute direct.

De pildă, în programul unui „complex" de accelerare pot fi prevăzute experimente cu fascicule directe de protoni, iar experimentele cu mezoni, cu neutrini și cu fotoni se pot realiza prin intermediul fasciculelor secundare.

Fasciculele secundare prezintă un deosebit interes; în special experimentele cu neutrini au polarizat atenția cerce-

tătorilor în ultimii ani, deoarece neutrinul se supune doar forței slabe nucleare. Astfel proprietățile acestei forțe pot fi studiate fără interferență cu alte evenimente.

Dar acceleratoarele în care se folosesc substanțe-țintă au un inconvenient serios prin aceea că o mare parte a energiei se irosește fără efect. De pildă, dacă un proton cu o energie mare, de 500 GeV, lovește o substanță-țintă, ar fi de așteptat ca toată această energie să fie utilă în interacție. Dar lucrurile nu stau chiar așa. Atunci cînd protonul-proiectil lovește un proton dintr-un nucleu-țintă, din cauza efectului relativist protonul-proiectil are masa de 530 de ori mai mare decît a cea protonului-țintă. În astfel de situație, particula accelerată nu mai este oprită prin coliziune, după cum nu ar fi oprit un camion care se ciocnește de o bicicletă. Cele două particule împreună își vor „reține" o energie de 469 GeV și pentru evenimente nucleare rămîne o energie „utilă" de doar 31 GeV! Adică, dacă într-un accelerator cu țintă fixă se dorește obținerea unei energii utile de 100 GeV, fasciculul de particule format din protoni ar trebui să aibă o energie de peste 10 TeV! — o valoare abia visată de tehnicienii nucleari...

Studiul ciocnirilor frontale a sugerat însă o soluționare a problemei. Anume, două particule, avînd masele de repaus egale, ambele accelerate astfel ca să aibă aceeași energie, dar mișcîndu-se în sensuri opuse, pot fi dirijate încît să se ciocnească frontal. Simplu vorbind, printr-o astfel de coliziune ambele pot fi oprite din mișcare, iar suma energiilor avute poate fi cedată mediului. Dacă particulele au masele de repaus egale, pentru a atinge 100 GeV este necesar să se asigure coliziunea a două fascicule ale particulelor respective, avînd fiecare energia de 50 GeV. Avantajul acestei metode de lucru este evident.

Coliziunile frontale pot fi organizate prin construirea așa-numitelor *inele de stocare*, în care fasciculele de particule circulă încontinuu. Un inel de stocare este asemănător unui sincrotron: are o cameră inelară vidată, înconjurată de magneți de deflexie și de focalizare, avînd și cel puțin o cavitate de radiofrecvență. De obicei, inelul de stocare nu este folosit pentru a mări energia particulelor, ci doar pentru a le menține pe o orbită constantă și la o energie constantă. Cavitatea de radiofrecvență servește doar pentru a furniza atîta putere

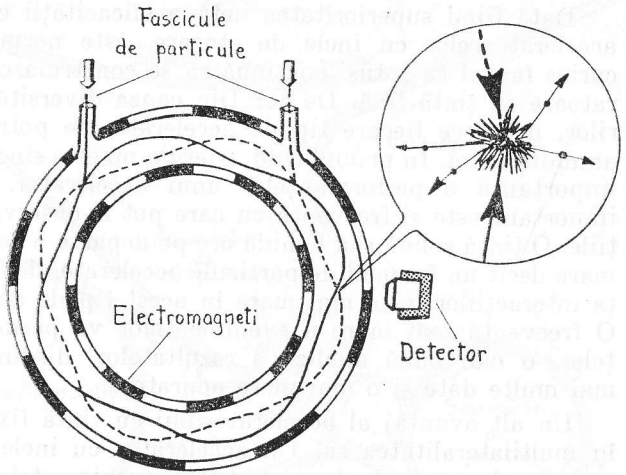


Fig. 21. Inelele de stocare, cu puncte de intersecție, permit să crească considerabil eficacitatea coliziunilor frontale ale particulelor accelerate. Interesul este să se studieze fragmentele rezultate în urma coliziunilor, cît și interacțiile lor. Principiul constă în a accelera două tipuri de particule (de pildă protoni și antiprotoni sau electroni și pozitroni), în sensuri opuse, sub formă de fascicule, care sînt antrenate în coliziuni atunci cînd ating viteza maximă. În cazul coliziunilor frontale, energia pusă în joc este dublă față de acceleratoarele cu țintă fixă.

cît să compenseze energia pierdută prin așa-numita *radiație sincrotron*.

O metodă de a produce colizinui frontale constă în construirea a două inele de stocare tangente. Particulele vor coliziona în punctele de contact. O altă cale constă în aranjarea inelelor de stocare încrucișate, ca șuvițele unei împletituri; fasciculele vor coliziona la fiecare intersecție.

Dar cea mai iscusită folosire a inelelor de stocare este realizată atunci cînd cele două fascicule ce urmează să colizioneze sînt formate unul din particule, iar celălalt din antiparticulele respective (de pildă, electroni și pozitroni). În acest caz, totul se rezolvă folosind un singur inel de stocare, coliziunile putînd fi obținute în două puncte diametral opuse ale inelului.

Dată fiind superioritatea netă a eficacității energetice a acceleratoarelor cu inele de stocare, este normal să pară curios faptul că totuși continuă să se construiască și accelerratoare cu țintă fixă. De ce? Din cauza diversității cercetărilor, deoarece fiecare tip de accelerator se potrivește unei anumite fizici. În primul rînd, energia nu este singura măsură importantă a performanțelor unui accelerator. Un factor important este și frecvența cu care pot fi observate interacțiile. O țintă solidă sau lichidă are pe departe o densitate mai mare decît un fascicul de particule accelerate, deci și frecvența interacțiilor este mai mare în acest tip de acceleratoare. O frecvență mai mare a evenimentelor va permite, bineînțeles, o mai bună analiză a rezultatelor, dispunîndu-se de mai multe date și o mai mare acuratețe.

Un alt avantaj al acceleratorului cu țintă fixă constă și în multilateralitatea sa. Un accelerator cu inele de stocare permite, în general, doar studierea evenimentelor cîte unui singur fel de coliziuni: electron-pozitron sau proton-anti proton etc., pe cînd coliziunile unui fascicul de particule cu o țintă fixă pot genera o mare varietate de fascicule secundare formate din neutroni, neutrini, mezoni, antiprotoni etc.

Deci, cercetătorii își pot adapta cercetările pe instalațiile care corespund cel mai bine scopului urmărit.

Giganții și rudele mai mici

Instalațiile de accelerare sînt extrem de scumpe și de aceea numai țările puternic industrializate pot participa la „cursa pașnică" pentru obținerea unor priorități de cercetare.

Dacă se lasă la o parte instalațiile de accelerare din multe laboratoare, de dimensiuni relativ reduse, în care se fac experimente de detalii, marile instalații de accelelrare sînt legate de numele unor institute de cercetare și laboratoare la care lucrează echipe de cercetători din întreaga lume.

Printre marile acceleratoare pot fi amintite cele de la CERN — Geneva (PS-protoni — 28 GeV și SPS-protoni 500 GeV), Brookhaven — S.U.A. (protoni 33 GeV), Stanford — S.U.A. (electroni — 22 GeV), Fermilab, Batavia — S.U.A. (protoni 500 GeV), Japonia (protoni 12 GeV), Dubna — U.R.S.S. (protoni 10 GeV), Serpuhov — U.R.S.S. (protoni 80 GeV) etc.

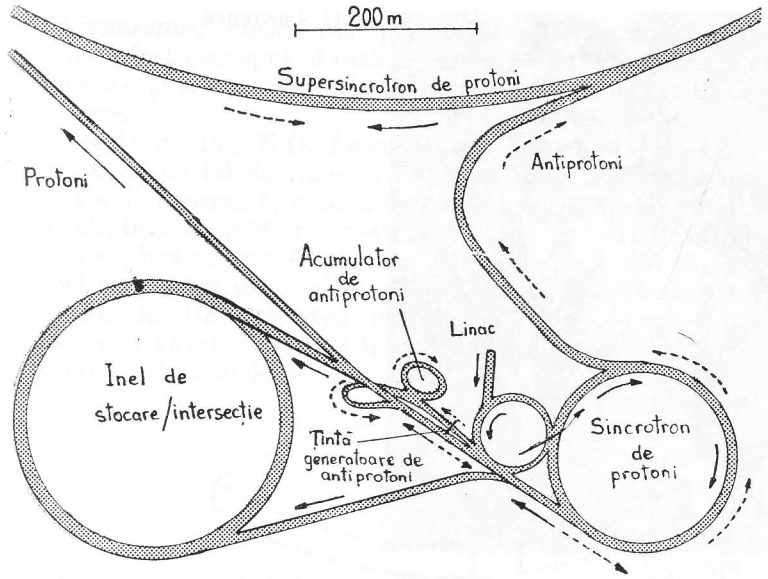


Fig. 22. Schița giganticei instalații de la Fermilab.

Deși față de giganticele sincrotroane și supersincrotroane amintite, toate celelalte acceleratoare, din diversele laboratoare și centre de cercetare mai mici par aproape niște jucării, ele totuși continuă să fie construite și să funcționeze, efectuînd o valoroasă muncă „de rutină", pentru detalierea multor fenomene subatomice.

În afară de acceleratoarele liniare electrostatice și cele cu tensiune variabilă (linac), mai este folosit independent și generatorul Cockroft-Walton (amintit ca generator de preaccelerare în marile instalații de accelerare). Acest generator este, de asemenea, de tip electrostatic, care are generatorul de tensiune format din capacitori legați în paralel și cu descărcare în serie. Schema de lucru permite obținerea unor tensiuni de ordinul milioanelor de volți, prezentînd totodată și o mare stabilitate în funcționare. Este folosit în domeniul energiilor joase (sub 2 MeV), ca accelerator de ioni, atît în laboratoarele de cercetare, cît și în industrie.

Dintre acceleratoarele de rezonanță mai pot fi amintite betatronul și ciclotronul.

E.O. Lawrence

Betatronul este construit pe o idee emisă încă din 1927 și constă în accelerarea electronilor într-un cîmp magnetic rotațional. Deși energiile obținute sînt relativ mici (50 MeV), betatronul este totuși un instrument ideal pentru cercetare în fizica energiilor joase. El se compune dintr-o incintă toroidală vidată, de obicei din sticlă sau ceramică, așezată între piesele polare ale unui electromagnet, care creează un cîmp orientat perpendicular pe planul traiectoriei circulare a electronilor. El funcționează în regim pulsatoriu, accelerînd un „mănunchi" de electroni în circa 20 ms, după care se injectează un nou „pachet" de electroni etc.

O variantă perfecționată a betatronului este *microtronul*, care modelează fasciculul de electroni printr-un cîmp magnetic constant și uniform, iar pentru accelerare folosește sistemul de cavități rezonante de radiofrecvență (microunde).

Betatronul, microtronul și linacul, pe lîngă serviciile pe care le aduc studiilor de cercetare fundamentală, au aplicații deosebit de utile în industrie: gama-defectoscopie, radioanaliză, iradiere pentru modificarea calităților unor produse, în chimie, în industria ușoară, în agricultură, în tehnica medicală (tratamentul cancerului) etc.

Ciclotronul, considerat părintele acceleratoarelor moderne, a fost conceput și realizat în anii 1930—1931, de E.O. Lawrence și a constituit, la timpul său, o culme a tehnicii nucleare.

Foarte ciudat, E.O. Lawrence nu a fost propriu-zis un fizician, ci un fel de Edison! Tatăl său era inspector școlar, iar el a avut acces la o serie de cărți de știință, devenind de mic electronist amator, construind emițătoare radio și alte aparate electronice. A absolvit Universitatea din Yale și a fost considerat un student strălucit, de mare viitor. A fost profesor la Universitatea din California și, întîmplător, după ce a văzut o schemă într-un articol de electrotehnică, i-a venit ideea ciclotronului.

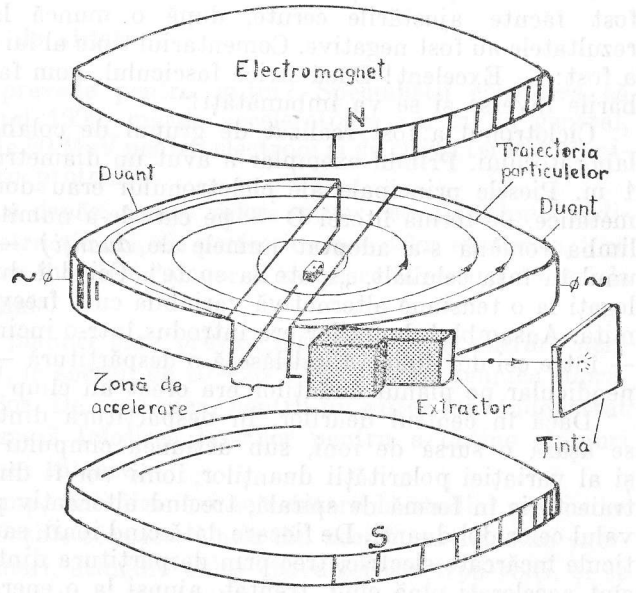


Fig. 23. Ciclotronul.

După cum scrie E. Segrè despre E.O. Lawrence: Cu toată educația sa formală, el niciodată nu a reușit să-și însușească o cultură rafinată nici în fizică și nici în alte domenii. Dar, pe de altă parte, a avut un real simț intuitiv pentru fizică, o mare putere de finalizare și abilitate în organizarea colec-

tivului de lucru... Mulți fizicieni, chiar în laboratorul său cunoșteau mai multă fizică nucleară și chiar tehnica acceleratoarelor decît Lawrence. Oricum, el a fost un element vital, unic în laboratorul pe care l-a creat în jurul invenției sale... Extraordinarul său entuziasm și spirit de conducere, cît și personalitatea sa au fost mai importante decît știința sa".

Cu toate că a reușit să înființeze (obținînd fonduri) un puternic laborator, înconjurîndu-se cu un personal științific excelent (cărora le-a lăsat o considerabilă libertate de acțiune), Lawrence a rămas oarecum un nepriceput, adept al forței brute în comportarea față de instalații.

Tot E. Segrè scrie: „Odată, Lawrence a sugerat cîteva modificări la piesele polare ale ciclotronului. După ce au fost făcute ajustările cerute, după o muncă laborioasă, rezultatele au fost negative. Comentariul tipic al lui Lawrence a fost: — Excelent! Dacă strică fasciculul, vom face schimbările inverse și se va îmbunătăți!"

Ciclotronul a fost realizat de grupul de colaboratori ai laboratorului. Primul exemplar a avut un diametru de circa 1 m. Piesele principale ale ciclotronului erau două „cutii" metalice, de forma literei D — pe care le-a numit *deuri* (în limba română s-a adoptat numele de *duanți)* —, așezate unul în fața celuilalt, „spate la spate". Cei doi duanți erau legați la o tensiune alternativă variabilă cu o frecvență anumită. Ansamblul duanților era introdus într-o incintă vidată — între cei doi duanți fiind lăsată o despărțitură —, iar perpendicular pe planul duanților era creat un cîmp magnetic.

Dacă în centrul deurilor, în despărțitura dintre duanți se așază o sursă de ioni, sub acțiunea cîmpului magnetic și al variației polarității duanților, ionii vor fi dirijați pe o traiectorie în formă de spirală, trecînd alternativ prin intervalul celor doi duanți. De fiecare dată cînd ionii, sau alte particule încărcate electric, trec prin despărțitura dintre duanți, sînt accelerați pînă cînd, treptat, ajunși la o energie de valoare maximă sînt extrași din accelerator, pentru a interacționa cu o anume substanță.

Spre binele tehnicii nucleare, Lawrence s-a dedicat în exclusivitate perfecționării propriu-zise a instalațiilor, neinteresîndu-se de cercetările din fizica nucleară. Dar, pe de altă parte, această unilateralitate l-a privat de prioritatea cîtorva descoperiri epocale din fizică. De pildă, cu circa

doi ani înainte ca soții Joliot-Curie să anunțe descoperirea radiactivității artificiale a aluminiului, Lawrence a realizat în ciclotronul său substanțe radioactive în cantități de mii de ori mai mari decît cele observate de fizicienii francezi. Mai tîrziu aceeași situație s-a petrecut cu fisiunea... În schimb tinerii fizicieni din colectivul său, pe ascuns, ori de cîte ori se ivea vreo posibilitate, foloseau ciclotronul pentru experiențe științifice...

Deși ciclotronul are performanțele limitate (20—25 MeV pentru particule grele (protoni) și 10 keV pentru electroni), el este încă utilizat în laboratoare, în diverse cercetări de fizică nucleară. El mai păstrează însă și o notă din romantismul primelor succese în tehnica nucleară...

Planuri de viitor

Ce se prevede pentru viitor? Specialiștii consideră că pînă în anul 1990, marile acceleratoare vor fi, în general, la nivelul de 50 MeV pentru electroni și de cîțiva teraelectronivolți pentru protoni.

Pentru a depăși aceste valori se vor cere fie tehnici radicale la construcții noi, fie perfecționarea celor existente, însă costurile vor fi enorme și vor fi necesare investiții materiale multinaționale.

Există planuri care prevăd instalații de accelerare pentru protoni, la energii de 10—20 TeV, folosind tehnica supraconductorilor. De asemenea, pentru un viitor mai îndepărtat se preconizează folosirea laserilor pentru a obține cîmpuri electrice mai intense.

Între timp, unii fizicieni se reîntorc la studiul particulelor din radiațiile cosmice. Unele din aceste particule au energii foarte mari, atingînd chiar cîțiva teraelectron-volți, și se crede că ele sînt accelerate de supernove, formațiuni cosmice care în prezent au atras mulți cercetători.

Alți fizicieni fac experimente fără a folosi deloc instalații de accelerare, deplasîndu-se în adîncuri, în mine părăsite, în căutarea unor evenimente cu totul speciale: dezintegrarea protonului, monopolii magnetici, neutrinii solari. Neutrinii formează obiectul vînătorii unor alte grupuri de fizicieni,

care și-au instalat locul de cercetare în jurul marilor reactoare nucleare.

Pe de altă parte, unii teoreticieni — nerăbdători și nemulțumiți cu energiile relativ joase ce se obțin chiar cu cele mai puternice acceleratoare terestre —, studiază cosmologia pentru a examina produsele celui mai mare accelerator de particule care ar fi fost „Marea explozie" (Big Bang-ul). (Problema este amplu prezentată în volumul *Primele trei minute ale Universului*, de S. Weinberg, Edit. Politică, București, 1985.)

Capitolul 9

ENERGIA NUCLEARĂ

Defectul de masă — sursă modernă de energie

Tot ce s-a prezentat pînă la acest capitol, deși constituie o cucerire greu de ierarhizat a inteligenței, ar putea foarte ușor să fie socotită ca o simplă satisfacere a curiozității specifice omului. Au fost pătrunse adîncimi nebănuite ale secretelor naturii, invizibilul a devenit palpabil prin iscusința omului de a-și crea și perfecționa uneltele într-o consecvență ce-i este proprie încă din negurile istoriei. Și totuși, cuceririle ar fi rămas doar în domeniul simplelor răspunsuri la cîteva întrebări, dacă din noianul de evenimente nu s-ar fi desprins acele noțiuni care au permis aceluiași om să ajungă la izvoarele unor surse uriașe de energie, care să-l ajute.

Eliberarea energiei nucleului atomic, concretizarea unui uriaș volum de cercetări de-a lungul timpului, și-a făcut o intrare brutală în conștiința oamenilor, în anul 1945, cînd au explodat bombele atomice deasupra orașelor Hiroshima și Nagasaki.

Cum s-a ajuns la această colosală energie? Pentru a răspunde, nu mai este nevoie de cunoștințe suplimentare teoretice față de cele prezentate pînă acum. Totul se datorează conexiunilor făcute de cercetători, folosind datele publicate, cunoscute de toată lumea științifică.

Din toate experimentele făcute asupra nucleului atomic, se știa că nucleonii componenți sînt puternic legați între ei și că masa agregatului de protoni și neutroni, care aparent lipsește atunci cînd se face comparația între masa nucleului ca atare, și suma maselor nucleonilor luați separat, corespunde energiei de legătură a nucleului respectiv.

Exemplul cel mai simplu este dat de elementul al cărui nucleu este format din mai mult de o singură particulă, adică izotopul 2 al hidrogenului — deuteriul. Nucleul deuteriului (deutonul) este constituit dintr-un proton și un neutron. Deoarece masa atomică a protonului este de 1,00727 u (0,9382 GeV/c^2) — u fiind unitatea atomică de masă —, iar

cea a neutronului de 1,00866 u (0,9395 GeV/c^2), suma părților componente ale deutonului ar fi 1,00727 u + 1,00866 u = = 2,0159 u (1,8776 GeV/c^2). (1 u = 0,931 GeV/c^2.)

Dar măsurătorile directe arată pentru masa deutonului o valoare care i-a pus în încurcătură pe fizicieni, anume 2,0135 u (1,8754 GeV/c^2)! Unde a dispărut diferența de 2,0159 — 2,0135 = 0,0024 u?

Răspunsul a fost dat cu ajutorul cunoscutei relații $E=mc^2$, care permite evaluarea *defectului de masă* în unități de energie. Adică, 1,8776 GeV/c^2 — 1,8754 GeV/c^2 = 0,0022 GeV/c^2. Această valoare a defectului de masă, exprimată în unități de energie, reprezintă așa-numita *energie de legătură* a nucleonilor din deuton.

Cu alte cuvinte, protonul și nucleonul, care constituie nucleul de deuteriu, sînt legați împreună cu o energie de circa 250 000 de ori mai mare decît energia care ține legați împreună cei doi atomi ai unei molecule de hidrogen!

Experiențele au fost cu totul de acord cu aceste considerații teoretice, arătînd că atunci cînd un proton „captureaz㓠un neutron pentru a forma un deuton, este emisă (sub forma unor fotoni gama) o energie de 2,23 MeV! Acest acord perfect între previziunile teoretice și datele experimentale a fost înregistrat într-un număr enorm de mare de măsurători. Or, prin aceasta a fost confirmată nu numai echivalența einsteiniană dintre masă și energie, ci și interpretare teoretică a defectului de masă ca energie de legătură a nucleelor.

Calcule analoage au fost făcute pentru toate nucleele, organizîndu-se sistematizări, urmărind, în special, cît anume din energia de legătură ar reveni pe un singur nucleon. De pildă, energia de legătură a particulei alfa este de 28 MeV, pe fiecare nucleon revenind 7 MeV (28:4); nucleul de litiu are energia de legătură de 30,5 MeV, revenind pe nucleon 5 MeV (30,5:6). Astfel s-au calculat energiile de legătură medii pe nucleon, iar sistematizarea lor arată că ea nu este constantă, ci variază, crescînd, pe măsură ce se trece la elemente cu numărul atomic mai mare.

Desigur, un nucleu este cu atît mai stabil cu cît este mai mare energia de legătură medie pe nucleonii săi. O diagramă a acestor valori a scos în evidență un rezultat remarcabil: nucleele cele mai stabile sînt cele cu masa atomică medie. Dacă se urmăresc valorile energiilor de legătură medii pe nucleon se constată că se pleacă de la valori mici, se atinge

valoarea de 8,5 MeV pe nucleon pentru nucleele cu masă atomică medie și descrește din nou pe măsură ce se ajunge spre elementele grele. Ca un exemplu, uraniul-238 are energia de legătură medie pe nucleon egală cu 7,5 MeV.

Cum se poate ajunge la energia de legătură? Evident, trebuie produse reacții la nivelul nucleelor atomice pentru a putea elibera energia de legătură. Dar nu orice fel de reacții, ci numai cele de tipul *exoenergetic*, adică cu eliberare de energie (față de tipul de reacție *endoenergetic*, care pentru a se produce solicită un aport de energie din exterior).

Ca regulă generală trebuie avut în vedere faptul că o reacție nucleară va fi exoenergetică atunci cînd are ca efect trecerea de la nuclee avînd energia de legătură pe nucleon mai mică, la nuclee cu energia de legătură pe nucleon mai mare. Aceasta deoarece în astfel de procese masa totală se „diminuează“; această „diminuare“ multiplicată cu c^2 este tocmai valoarea energiei care se eliberează în reacție!

Energia eliberată se regăsește în energia cinetică a produselor fisiunii și a particulelor emise. Or, aceste particule ciocnindu-se cu mediul înconjurător cedează energia cinetică, avînd ca efect ridicarea temperaturii zonei prin care trec. Cu alte cuvinte, mediul se încălzește, proces ce se va dovedi esențial în aplicațiile practice.

Revenind la diagrama amintită a energiilor de legătură medii pe nucleon, care arată că particulele constituente ale nucleelor elementelor de masă atomică medie (de la mijlocul tabelei sistemului periodic) sînt legate împreună cu o energie mai mare decît cea corespunzătoare nucleelor elementelor de masă atomică fie mai mică, fie mai mare, se poate completa regula de mai sus. Astfel, reacțiile exoenergetice se pot obține fie plecînd de la nuclee ușoare și ajungînd, prin *fuziune* la nuclee medii, fie plecînd de la nuclee grele și ajungînd prin *fisiune* la nuclee medii, adică relativ mai ușoare.

Acestea sînt cele două tipuri de reacții nucleare care pot duce la eliberarea energiei: fuziunea și fisiunea. Termenul de fuziune este folosit în sensul de „a uni“, „a topi împreună“, iar cel de fisiune în sensul de „a divide“, „a sparge“.

Pe un plan general se poate face o analogie între reacțiile de fuziune și fisiune și unele reacții chimice. De pildă, în flacăra oxihidrică ce rezultă din „amestecul“ moleculelor de hidrogen cu molecule de oxigen (formînd apă) are loc o reacție exoenergetică prin care se degajă o mare cantitate de

căldură; temperatura flăcării ajunge la 2 800°C. Această reacție chimică este o reacție oarecum analoagă reacției de fuziune nucleară. Pe de altă parte, explozibilul numit fulminat de mercur dă un exemplu de reacție exoenergetică analoagă fisiunii nucleare. De fapt, atunci cînd fulminatul de mercur este percutat explodează, adică se scindează brusc în componentele sale, dînd naștere la o mare cantitate de gaz, la o temperatură înaltă și la o undă de presiune care se propagă cu viteza de circa 3 km/s.

Reacția în lanț

Fisiunea nucleară se realizează practic prin scindarea nucleelor cu numere atomice mari: toriul (Z=90), protactiniul (Z=91), uraniul (Z=92), precum și cu elementele care urmează în tabelul sistemului periodic (transuraniene) care, deși nu există în natură, pot fi produse artificial: neptuniul (Z=93), plutoniul (Z=94) etc.

Mecanismul scindării nucleului este cunoscut din cele prezentate anterior. Astfel, un nucleu aparținînd unui element greu, de pildă nucleul de uraniu, lovit de un neutron (sau chiar de o altă particulă), îl absoarbe imediat și se „sparge" în alte două nuclee, de masă atomică medie, emițînd totodată 2—3 neutroni. Acesta este, de fapt, procesul numit *fisiune nucleară*.

Reacțiile de fisiune diferă după felul cum se repartizează nucleonii și „proiectilele" utilizate. De pildă, un nucleu de uraniu de masă atomică 235, lovit de un neutron, poate da naștere la un nucleu de tehnețiu (Z=52), la un nucleu de zirconiu (Z=40) și la 3 neutroni; sau la un nucleu de scandiu (Z=50), un nucleu de molibden (Z=42) și 4 neutroni etc.

Această împărțeală „la mica înțelegere" a nucleonilor este oglindită în cele ce se întîmplă practic atunci cînd o masă de uraniu este bombardată cu neutroni: în ea vor avea loc toate reacțiile de fisiune posibile, dînd naștere la circa 80 de izotopi ai nucleelor de masă atomică medie!

Dar toți acești izotopi au o caracteristică comună: nucleele lor posedă prea mulți neutroni pentru a fi stabile. Astfel, toți izotopii produși prin fisiune vor suferi dezintegrări beta, putînd fi astfel socotiți drept „capi de familii" artificial radioactive.

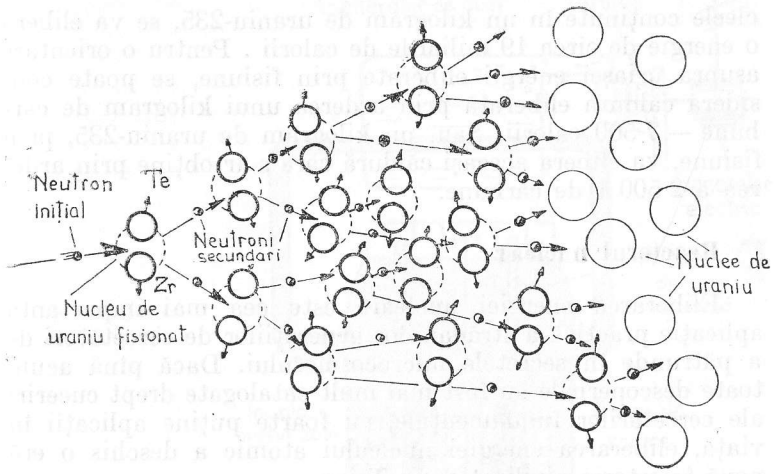


Fig. 24. Reacția în lanț

Un amănunt al reacției de fisiune, care ar părea neglijabil, s-a dovedit a fi de o importanță capitală în istoria fizicii nucleare. Este vorba despre acei 2—4 neutroni secundari, care se emit în fiecare eveniment de scindare a nucleului ce a absorbit un neutron. Acest „amănunt" a permis punerea la punct a unui mecanism care permite ca într-o masă de *substanță fisionabilă* reacția să se propage la toate nucleele.

De fapt, atunci cînd un neutron lovește un nucleu dintr-o masă de uraniu și acesta prin fisiune emite doi sau trei neutroni secundari, fiecare din acești neutroni secundari va provoca fisiunea altor nuclee, cu producerea altor neutroni secundari care, la rîndul lor, continuă fisiunea etc. În felul acesta se obține ceea ce se numește o *reacție în lanț*, prin care un singur neutron inițial poate provoca fisiunea unui număr enorm de nuclee.

Posibilitatea de a da naștere unei reacții în lanț într-o substanță fisionabilă a condus, în final, la realizarea unor instalații care să permită utilizarea practică a energiei nucleare.

Atunci cînd un nucleu de uraniu-235 fisionează în urma absorbirii unui neutron, el eliberează o energie de circa 190 MeV. Un calcul simplu arată că dacă fisionează toate nu-

cleele conținute în un kilogram de uraniu-235, se va elibera o energie de circa 19 miliarde de calorii . Pentru o orientare asupra uriașei energii eliberate prin fisiune, se poate considera căldura eliberată prin arderea unui kilogram de cărbune — 7 500 calorii. Sau, un kilogram de uraniu-235, prin fisiune, va elibera aceeași căldură care s-ar obține prin arderea a 2 500 t de cărbune.

Reactorul nuclear

Eliberarea energiei nucleare este cea mai importantă aplicație practică a strădaniilor generațiilor de cercetători de a pătrunde în secretele microcosmosului. Dacă pînă acum toate descoperirile au fost mai mult catalogate drept cuceriri ale cercetărilor fundamentale, cu foarte puține aplicații în viață, eliberarea energiei nucleului atomic a deschis o eră nouă în istoria civilizației pe Terra.

Instalațiile care pot realiza un proces de fisiune printr-o reacție în lanț au fost numite *reactori nucleari*. Primul reactor nuclear a fost pus în funcțiune la 2 decembrie 1942, la Chicago, de un grup de fizicieni condus de E. Fermi. În acea zi memorabilă, pentru prima dată oamenii au reușit să obțină o reacție nucleară în lanț, capabilă să se automențină.

La început, reactorul a avut o putere de ...0,5 W, ca după cîteva zile să fie ridicată la 20 W. Abia peste doi ani a fost construit un reactor mai puternic, de 1 800 kW, pentru ca ulterior să se atingă valori mai mari.

Principiul de funcționare a unui reactor nuclear este destul de simplu. Un neutron *lent* produce scindarea unui nucleu de uraniu-235 care, în procesul de fisiune emite și 2—3 neutroni *rapizi*. Pentru ca acești neutroni să poată produce fisionarea altor nuclee de uraniu-235, ei trebuie să fie încetiniți. În acest scop trebuie folosite substanțe moderatoare care, amestecate potrivit cu uraniul, încetinesc neutronii rapizi emiși în procesul de fisiune. După cum s-a menționat anterior, încetinirea neutronilor se datorește ciocnirilor elastice ale neutronilor rapizi cu atomii moderatorului.

Printre moderatorii cei mai eficienți se află apa grea, beriliul, oxidul de beriliu și grafitul. Moderatorii încetinesc neutronii rapizi (circa 1 MeV) pînă cînd energia lor atinge o valoare de ordinul sutimilor de electron-volt.

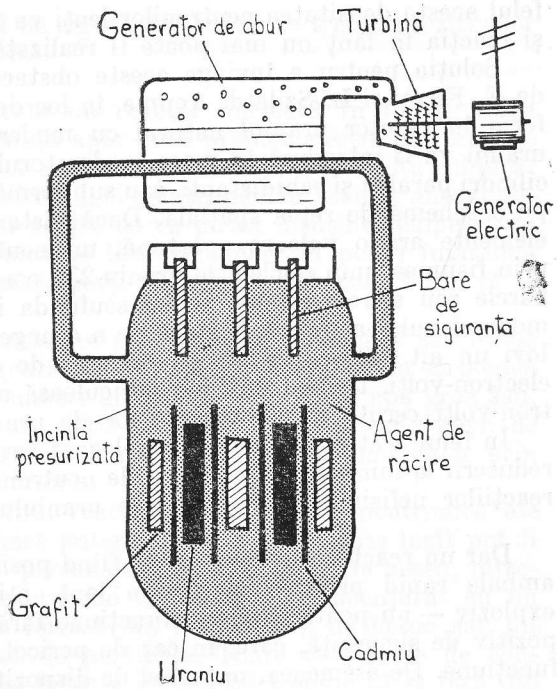


Fig. 25. Reactorul nuclear.

Una din marile dificultăți tehnice în realizarea unei reacții nucleare controlate o constituie însă faptul că uraniul, pe lîngă izotopul 235 (fisionabil) mai cuprinde în mare proporție izotopul 238, care nu este fisionabil. Mai precis, uraniul-238, absorbind un neutron se transformă în plutoniu, fără a fisiona. Deci, într-o grămadă de uraniu natural, amestecat cu substanța moderatoare, neutronii secundari rapizi sînt încetiniți treptat, energia lor trecînd prin toate valorile posibile, de la 1 MeV pînă la sutimi de electron-volt. Or, nucleele de uraniu-238 sînt extrem de avide să captureze neutroni cu energia de cîțiva zeci de electron-volți, pe care îi absoarbe fără a fisiona. Deci, pînă ce neutronii ating valoarea potrivită pentru a putea fi activi în procesul de fisiune a uraniului-235, ei trec prin valoarea „periculoasă" și cea mai mare parte a lor dispare în nucleele uraniului-238. În

felul acesta densitatea neutronilor lenți va fi mult micșorată și reacția în lanț nu mai poate fi realizată.

Soluția pentru a învinge aceste obstacole a fost găsită de E. Fermi și L. Szilard. Anume, în loc de a amesteca uniform în reactor uraniul natural cu moderatorul, masa de uraniu va fi introdusă în masa moderatorului sub formă de cilindri paraleli și echidistanți, sau sub formă de sfere aliniate pe o schemă de rețea spațială. Dacă distanța dintre aceste elemente are o valoare oportună, un neutron rapid, emis prin fisiunea unui nucleu de uraniu-235 conținut în una din barele sau sferele rețelei, se va scufunda imediat în masa moderatorului astfel că, înainte de a ajunge în situația de a lovi un alt nucleu, va atinge valoarea de cîteva sutimi de electron-volți, trecînd de zona periculoasă a zecilor de electron-volți cerută de capturarea lor de uraniul-238.

În felul arătat mai sus a fost elegant revolvată problema reducerii la minimum a pierderii de neutroni rapizi datorată reacțiilor nefisionabile cu nucleele uraniului-238.

Dar un reactor nuclear — dată fiind posibilitatea de a se ambala rapid printr-o reacție în lanț, atingînd un nivel exploziv — nu poate fi pus în funcțiune fără a avea un dispozitiv de siguranță, care, în caz de pericol, să-l scoată din funcțiune. De asemenea, un astfel de dispozitiv ar putea să-i controleze funcționarea, asigurîndu-i un regim de lucru constant.

Controlul unui reactor nuclear se obține, de pildă, introducînd în orificii anume practicate în masa moderatorului, cîteva bare de oțel și cadmiu. Deoarece cadmiul are proprietatea de a captura neutronii lenți prezenți în reactor, introducînd mai mult sau mai puțin în modelator barele menționate, se poate modifica după dorință numărul neutronilor „pierduți", deci a menținerii reacției în lanț la nivelul proiectat.

Cum se amorsează un reactor nuclear? La început, adică atunci cînd reactorul nu este în funcțiune, barele de cadmiu sînt toate introduse la maximum în masa moderatorului. Pentru a amorsa reacția în lanț se scot încet barele pînă cînd se ajunge la condițiile în care se pornește reacția și reactorul începe să funcționeze. Puterea sa crește treptat, iar atunci

cînd atinge nivelul de siguranță, barele se trec dispozitivelor automate de control.

Cum se comportă un reactor nuclear? În funcționarea unei astfel de instalații apar două probleme esențiale. Înainte de toate, un reactor nuclear va genera foarte multă căldură; deci se impune găsirea unei soluții pentru răcirea ansamblului. Numai în felul acesta se va putea menține temperatura reactorului sub valoarea limită la care el poate funcționa fără pericolul ca unele părți ale sale să se topească sau să se deterioreze.

Răcirea reactorului se poate obține făcîndu-se să circule un agent potrivit (care poate fi un gaz — anhidrida carbonică sau un gaz nobil, uneori un lichid — apă sau apă grea sau, uneori, un lichid de natură organică), printr-un sistem de canale care traversează reactorul, uneori trecînd chiar prin jurul barelor de uraniu.

În al doilea rînd, reacțiile secundare și neutronice ale unui reactor de mare putere sînt atît de intense încît pot fi periculoase pentru personalul din jurul său. De aceea, întregul complex al reactorului trebuie să fie înconjurat cu un ecran de protecție format din pereți groși de beton sau alt material absorbant de particule. Toate manevrele de control și menținere în lucru a instalației trebuie să se facă din spatele ecranului de protecție.

Desigur, există și alte scheme de obținere a reacției nucleare în lanț, care stau la baza diverselor tipuri de reactori nucleari; cea prezentată mai sus este doar un exemplu.

Industria atomică

Producția de reactori nucleari a proliferat rapid și astăzi, pe glob, sînt în funcțiune numeroase astfel de instalații, de diferite tipuri, cele mai multe însă fiind asociate cu generatoare electrice, constituind așa-numitele *centrale atomoelectrice* sau *centrale nuclearoelectrice*.

Fără a intra în amănunte de construcție sau de funcționare, pot fi amintite tipurile de reactoare ale timpului nostru. Progresele în acest domeniu au dus la o mare diversificare a acestor instalații, încît pentru o clasificare trebuie găsită una din multiplele direcții pe care le-au luat aspectele lor fizice și tehnice. Astfel, există clasificare după felul neu-

tronilor care produc fisiunea (termici sau rapizi), după destinație (de cercetare, de putere), după structura zonei active (eterogeni, omogeni), după tipul de moderator (apă, apă grea, grafit etc.), după agentul de răcire și natura combustibilului nuclear (uraniu natural, uraniu îmbogățit, toriu, plutoniu etc.).

Din punctul de vedere al neutronilor care produc fisiunea, merită puțină atenție cele două tipuri de reactori nucleari. Există reactori nucleari care funcționează pe baza neutronilor termici, pentru care există o tehnologie bine pusă la punct, dar în prezent sînt în curs de perfecționare și reactoare cu neutroni rapizi.

În reactorii cu neutroni termici, procesul de fisiune decurge potrivit schemei analizate anterior, dar cu unele modificări. Astfel, în reactorii actuali de acest tip nu se folosește uraniu natural, ci uraniu îmbogățit, adică masa de uraniu fisionabil conține mai multe nuclee de uraniu-235 decît cel natural. Cu cît masa fisionabilă este mai bogată în izotopul uraniu-235, cu atît randamentul reactorului este mai mare. Dar îmbogățirea uraniului este o operație extrem de costisitoare...

Totuși, se mai construiesc și reactori nucleari care funcționează cu uraniu natural, răciți cu apă grea. Faptul că nu mai este nevoie de uraniu îmbogățit reprezintă unul din principalele avantaje, iar utilizarea apei grele, atît ca moderator, cît și ca agent de răcire și de transfer termic, este deosebit de fructuoasă, apa grea obținîndu-se industrial, la un preț rezonabil.

În prezent, cel mai eficient reactor nuclear cu uraniu natural este varianta canadiană CANDU, puterea maximă obținută fiind de circa 660 megavați-electrici (MWe). (De menționat că tipurile cele mai perfecționate de reactori nucleari ai prezentului ating puteri de pînă la 1 000—1 200 MWe). La acest tip, apa grea este folosită ca moderator în propriul său circuit, iar agentul de răcire (de asemenea apa grea) circulă prin tuburi de presiune în care se află combustibilul nuclear. Reactorii CANDU mai prezintă avantajul că lucrează la o temperatură relativ scăzută (80°C) și în acest caz absorbția de neutroni în moderator este relativ mică.

La toate tipurile de reactori nucleari asociați producerii energiei electrice, în final, agentul de răcire trece în generatorul de abur, unde se realizează transferul de căldură unui

circuit de apă, pentru a obține aburul cu care se pot acționa turbinele generatoarelor electrice. Transferul de căldură este necesar întrucît agentul de răcire al reactorului este contaminat radioactiv și nu poate fi folosit direct.

Față de alte tipuri de reactori, tipul CANDU este favorizat, deoarece realizează puteri mari, folosește uraniu natural cu un randament bun (29%), poate folosi și apă obișnuită ca agent de răcire (sau alte lichide organice) și produce 3 kg/t prin transformarea uraniului-238. Este tipul de reactor potrivit pentru țările care nu au o industrie producătoare de uraniu îmbogățit.

Reactorii termici, în diversele lor variante, reprezintă doar un aspect al opțiunilor nucleare. Rezervele mondiale de uraniu, pe baza tehnologiei existente de exploatare în reactori, ar putea acoperi nevoile unui secol sau chiar mai mult, iar unii specialiști apreciază că o eră atomică bazată numai pe reactori termici va dura atît de puțin, încît cu greu se vor putea justifica investițiile făcute pentru instalații. În definitiv, randamentul scăzut cu care reactorul termic extrage energia legată de uraniul scos din mină (de cel mult 2%!) față de alte randamente energetice cunoscute, situează acest tip de instalații în grupa risipitorilor...

O soluție de îmbunătățire a fost totuși găsită prin crearea unui tip nou de reactor, în care randamentul extragerii energiei legate de uraniul scos din mină este de 60—75%

Noul tip de reactor, numit reactor reproducător cu neutroni rapizi, realizează acest cîștig punînd în consum izotopul uraniu-238, care constituie 99,3% din uraniul natural; în procesul de reacție, acest izotop trece în plutoniu. Spre deosebire de reactorii termici, în reactorii reproducători fisiunea uraniului și/sau a plutoniului are loc cu neutronii rapizi care apar din fisiunile anterioare.

Calea pentru a asigura funcționarea unui astfel de reactor constă, în principal, în eliminarea moderatorului. De aceea și agentul termic folosit pentru preluarea și transferul căldurii trebuie să aibă slabe proprietăți moderatoare, dar foarte bune de transfer termic, cum este, de pildă, sodiul lichid.

Sodiul lichid este astăzi cel mai folosit agent termic în reactorii reproducători, avînd un punct de fierbere ridicat,

ceea ce permite funcționarea instalației la temperaturi mari și presiuni joase.

Ce se petrece într-un reactor reproducător? Dacă neutronii rămîn „rapizi", cîțiva dintre ei vor lua parte la reacțiile de fisiune, iar alții vor fi captați de nucleele de uraniu-238, care fără să fisioneze trec în plutoniu. Este adevărat că reacții similare se produc și în reactoarele termice, dar nu au eficiența de conversie pe care o au reactorii reproducători.

Avantajul principal al acestui tip de reactori, care le permite să fie considerați ca generația următoare de reactori nucleari, îl constituie capacitatea de regenerare a combustibilului nuclear. „Inima" reactorului reproducător poate fi astfel dimensionată încît o mărime numită „coeficientul de regenerare" să fie supraunitar. (Coeficientul de regenerare reprezintă raportul dintre numărul de nuclee fisionabile nou produse și numărul de nuclee fisionabile arse în timpul funcționării.) Cu alte cuvinte, reactorul poate fi astfel dimensionat încît să transforme mai repede uraniul-238 în plutoniu, decît „ard" nucleele de uraniu-235 și plutoniu. În felul acesta, pe lîngă obținerea de energie, reactorul reproducător produce, în plus plutoniu care poate fi extras și folosit drept combustibil pentru alt reactor nuclear.

Deși reactoarele reproducătoare sînt în ofensivă și sînt promovate pentru motive clare, totuși ele au fost supuse unor critici deosebite din cauza plutoniului. Manipularea plutoniului este periculoasă pentru sănătate, fiind toxic, iar accesul prea larg la el poate să creeze posibilitatea de a fi utilizat în scopuri agresive, pentru construcția de bombe „artizanale".

Pentru a fabrica o bombă atomică sînt suficiente 5 kg de plutoniu, dacă se utilizează o incintă de beriliu (care are proprietatea de a reflecta neutronii ca într-o oglindă); cu uraniu se pot face bombe atomice numai dacă este îmbogățit cu peste 10% uraniu-235. Or, cum uraniul folosit în reactorii termici este îmbogățit sub 3,5%, el nu reprezintă un material exploziv, cu atît mai puțin uraniul natural.

În țara noastră, potrivit prevederilor Programului-directivă de cercetare și dezvoltare în domeniul energiei, în perioada 1986—1990 și orientările principale pînă în anul 2000, în anul 1990 puterea atomoelectrică instalată va fi de 3 960 MWe, pentru ca în anul 2000 să se atingă circa 10 000 MWe.

În această perioadă, cercetarea științifică și ingineria tehnologică națională vor asimila fabricarea echipamentelor și pregătirea combustibilului nuclear și al moderatorului (apa grea).

În prezent, pe șantierul de la Cernavodă, se află într-o avansată fază de construcție prima centrală atomoelectrică, obiectivul energetic de cea mai mare putere din cîte s-au construit pînă acum la noi: 3 500 MWe. Reactorii nucleari, în număr de cinci, sînt de tipul CANDU, furnizînd abur pentru cinci turbine și cinci generatoare electrice, grupuri energetice de cîte 700 MWe fiecare.

Un proces atrăgător

Cealaltă cale de a obține energie pe seama defectului de masă, adică formarea unui element mai greu prin unirea nucleonilor din care este constituit, sau a nucleelor elementelor mai ușoare, o reprezintă reacțiile de fuziune.

Pentru a produce o reacție de fuziune, de pildă a heliului din doi deutroni, este necesar ca cele două nuclee de deuteriu să fie puse în contact direct. Dar, după cum se știe, nucleele au sarcină electrică pozitivă, iar atunci cînd sînt foarte apropiate se resping. De aceea trebuie să fie dotate cu suficientă energie pentru a învinge forțele de respingere electrostatică; numai astfel ele se vor putea apropia unul de altul pentru a forma noul nucleu.

Este necesar, deci, ca masa gazului în care se urmărește obținerea unei reacții de fuziune (în cazul de față gaz de deuteriu) să fie menținută la o temperatură foarte înaltă, astfel ca nucleele care se află în stare de agitație termică să posede viteze suficient de mari pentru a putea învinge respingerea coulombiană reciprocă.

Adică, în general, pentru a produce reacții de fuziune este necesar să se cheltuiască energie. Urmărind procesul cu un ochi practic, dacă se dorește obținerea unei energii utile din procesul de fuziune, este evident că va trebui să avem un bilanț simplu: energia eliberată de reacție trebuie să fie mai mare decît cea cheltuită pentru a produce reacția. Altfel va fi un proces neinteresant pentru aplicații practice, sau, cum s-ar mai spune, „păgubos".

Energia excedentară din procesul de fuziune, care este tocmai energia de legătură dintre nucleoni, se eliberează sub

formă de energie cinetică a produselor reacției și poate fi ulterior convertită în forme utilizabile în practică, cum ar fi, de pildă, producerea de abur pentru turbine. Dar lucrurile nu se petrec totdeauna în acest fel, nu toate reacțiile de fuziune prezintă energie excedentară. Acest tip de reacție se produce doar pentru nucleele cele mai ușoare: izotopii hidrogenului și cei ai heliului. Dacă se trece, treptat, la nuclee mai grele, acestea au sarcina electrică pozitivă din ce în ce mai mare. În aceste cazuri trebuie mărită energia furnizată din exterior pentru a putea învinge forțele electrice de respingere.

Pot fi imaginate mai multe tipuri de reacții de fuziune, cu excedent de energie, dar prezintă interes doar fuziunea izotopilor hidrogenului, deoarece implică cel mai mic consum de energie pentru declanșarea reacției. De pildă, pot fi reacții de fuziune între două nuclee de deuteriu, obținîndu-se în urma procesului un nucleu de heliu plus un neutron, plus eliberarea unei energii de 3,25 MeV pe reacție; ori poate fi o fuziune între un nucleu de deuteriu și unul de tritiu (izotopul hidrogen-3), obținîndu-se un nucleu de heliu, plus un neutron, plus 17,6 MeV pe reacție.

Ca și în cazul fisiunii nucleare, în reacția de fuziune se pune în evidență defectul de masă, sub forma echivalentului său energetic, ce poate fi regăsit în energia cinetică a corpurilor rezultate din reacție.

Dar ce energie trebuie să aibă nucleele pentru a avea loc amorsarea reacției de fuziune? S-a găsit că valoarea acestei energii este cuprinsă între 4—50 keV, în funcție de nucleele care sînt luate în considerare. Dependența energiei atomilor unui gaz de temperatura mediului în care se află este cunoscută; atomii care se găsesc într-un recipient, la tempețatura mediului ambiant, au o energie cinetică de fracțiuni de electron-volt. Energia cinetică a atomilor este cu atît mai mare cu cît este mai mare temperatura la care se găsește gazul din care fac parte. Iar pentru a atinge o energie cuprinsă în intervalul menționat mai sus, de pildă 20 keV, temperatura gazului trebuie să fie de circa... 200 milioane de grade! Numai dacă se reușește ridicarea temperaturii unui gaz — de pildă de deuteriu — la această valoare vor putea avea loc reacții de fuziune.

Acum se poate înțelege ușor de ce reacțiile de fuziune mai sînt numite *reacții termonucleare.*

Fuziunea termonucleară controlată — deocamdată un vis frumos

Chiar înainte de anii '30, unii fizicieni au observat că protonii și alte nuclee ușoare, accelerate pînă la nivelul mai multor mii de electron-volți și lansate într-o țintă formată dintr-un element ușor, reușesc să depășească respingerea electrică a nucleelor-țintă și să se „topească" cu ele, dînd naștere la nuclee mai grele. Adică, s-a obținut procesul de fuziune nucleară. Dar pentru a obține oricare din aceste reacții era necesar să se cheltuiască o energie enormă.

Se poate deduce ușor că pentru a avea posibilitatea de a folosi în scopuri practice energia eliberată prin procesul de fuziune era necesar ca procesul o dată amorsat, să se autoîntrețină, fără altă intervenție din afară. Este exact ceea ce se petrece într-o reacție chimică obișnuită de combustie. O dată ce reacția a început, într-un oarecare punct al substanței, ea se automenține pe seama căldurii ce se degajă în propria reacție.

În reacția de fuziune, de asemenea, se degajă o anumită energie care ar putea favoriza producerea altor reacții în elementul considerat combustibilul fuziunii, ca deuteriul. Dar între o combustie chimică și o reacție de fuziune există o diferență enormă: în prima, temperatura de amorsare are valoarea de cîteva sute de grade, în timp ce reacția de fuziune se desfășoară optim abia la temperaturi de sute de milioane de grade.

La aceste temperaturi extrem de ridicate, substanța nu se mai află în nici una din cele trei stări cunoscute, solidă, lichidă sau gazoasă. Moleculele unui corp care au o energie cinetică atît de mare, de ordinul zecilor de kiloelectron-volți, corespunzătoare enormei temperaturi, se mișcă liber prin substanță, fără a mai suferi vreo influență din partea celorlalte molecule. În drumul lor vor fi deviate doar de evenimentele de ciocnire cu alte molecule sau cu pereții incintei în care eventual s-ar afla.

Substanța adusă la astfel de temperaturi trece într-o stare specială, care a primit numele de *plasmă.* Este un gaz de o compoziție specială, consistînd din nuclee și electroni liberi. De fapt, energia internă a „gazului" este atît de mare încît atomilor le sînt „smulși" toți electronii periferici; ei sînt astfel reduși doar la forma de nuclee. Astfel rezultă

plasma, în care nucleele și electronii se află în mișcare haotică, cu viteze extrem de mari.

Din punct de vedere electric, plasma, în ansamblul ei, este neutră, întocmai ca un gaz obișnuit, deoarece numărul sarcinilor negative (electronii) este aproape egal cu cel al numărului sarcinilor pozitive (al nucleelor).

Cum s-ar petrece o reacție termonucleară automențínută? Iată cum descrie fizicianul R.F. Post o experiență imaginară, în care sînt scoase în evidență proprietățile neobișnuite ale plasmei:

„Să introducem un litru de deuteriu (gaz) într-un recipient făcut dintr-un material ipotetic, capabil să reziste la enormele temperaturi și presiuni la care va fi supus gazul în decursul experienței. La temperatura mediului și la presiunea atmosferică moleculele deuteriului (stări legate de doi atomi) se vor mișca dezordonat în recipient, cu o energie medie de circa 0,25 eV (care corespunde la o viteză de circa 4,5 km/h). Desigur, nu se va petrece nici un fel de reacție de fuziune. Încălzim gazul pînă la 5000°. La această temperatură gazul nu mai prezintă stări legate sub formă de molecule; violența cu care se ciocnesc reciproc rupe legătura, gazul rămînînd numai sub formă de atomi de deuteriu. Presiunea ajunge la 40 atm și viteza medie a atomilor la circa 60 000 km/h.

Ridicăm temperatura la 100 000°. (Norocul nostru că recipientul este dintr-un material ipotetic, căci altfel nici un material cunoscut pînă în prezent n-ar fi rezistat acestor condiții; el s-ar fi evaporat cu mult înainte de a atinge această temperatură...) Acum atomii de deuteriu sînt „destrămați" în nuclee (deutroni) și electroni; cu alte cuvinte, gazul a trecut în starea care a primit numele de plasmă. Presiunea gazului a ajuns la 1 500 atm, viteza medie a electronilor este de 15 milioane de kilometri pe oră, iar cea a deutronilor, care au masă mai mare, de 255 000 km/h. Dar deutronii nu au încă energie suficientă pentru a învinge respingerea electrostatică reciprocă, pentru a putea fuziona. Probabilitatea ca, totuși, în aceste condiții să aibă loc fuziunea este de o reacție la... 500 de ani!

La un milion de grade, numărul reacțiilor de fuziune va fi de un miliard de miliarde de ori mai mare, dar, totuși, energia totală produsă va fi încă prea mică pentru a fi pusă

în evidență; cîteva milionimi de watt pe centimetrul cub! Dar la 100 milioane de grade, numărul reacțiilor de fuziune va fi cu adevărat remarcabil; presiunea va ajunge la 1,5 milioane de atmosfere, electronii vor avea o viteză de 135 km/s, iar deutonii 2 250 km/s (cu care ar putea face ocolul Pămîntului în... 16 secunde!). Toți deutronii vor reacționa între ei foarte rapid (fracțiuni de secundă), iar reacțiile vor avea o putere de 100 milioane de kilovați.

Dar nu am ajuns încă la punctul capital: pentru a susține reacția trebuie să mai furnizăm energie din exterior, pînă cînd fuziunea va suplini totul. Doar la 500 milioane de grade, „focul" (adică reacția termonucleară a deuteriului) se va putea automențíne."

Acest experiment imaginar creează o imagine sugestivă a condițiilor care trebuie realizate pentru a avea o reacție de fuziune automențínută și totodată a enormelor dificultăți tehnice ce trebuie învinse.

Chiar dacă, presupunînd că ar exista un material care să reziste condițiilor impuse unui recipient pentru plasmă, el nu ar fi de mare utilitate, deoarece plasma care atinge un corp solid se răcește foarte repede. De aici o importantă problemă tehnică: plasma nu are voie să intre în contact cu pereții unui eventual reactor!

O cale de a menține un nor de plasmă comprimată, fără a-l lăsa să atingă nimic solid, este captarea sa într-un cîmp magnetic. Acest lucru este posibil, deoarece plasma este constituită din particule cu sarcini electrice. Un cîmp magnetic puternic silește toate particulele cu sarcină electrică aflate în mișcare, care trec prin el, să-și devieze traiectoria rectilinie, în una circulară. Deci, dacă plasma dintr-un recipient este înconjurată de un puternic cîmp magnetic, particulele care o constituie sînt reținute de acest „zid magnetic" invizibil, numit și „capcană magnetică", și nu vor ajunge la pereții incintei, unde, prin contact, s-ar răci.

Cîmpul magnetic poate fi creat într-o mare varietate de forme, depinzînd de circuitele electrice care sînt folosite pentru generarea sa. Din nefericire, însă, un „container" magnetic nu are o formă bine definită, astfel încît să existe un capăt la care să se poată introduce plasmă. Apoi, geometria cîmpului magnetic produs de circuitele electrice are o asemenea formă încît este imposibil de făcut un sistem container complet închis, fără scurgeri; o plasmă fierbinte

poate găsi un punct slab în cîmp și, ca urmare, s-ar scurge rapid.

Cei circa 30 de ani de experiențe și construcția unor sisteme de containere magnetice din ce în ce mai complexe au dus la o creștere treptată a timpului de menținere a norului de plasmă. Specialiștii au proiectat diverse tipuri de containere magnetice, dintre care tipul de formă toroidală, elaborat de specialiștii sovietici, numit Tokamak, precum și cel al incintelor cu oglinzi, dau cele mai mari speranțe experimentatorilor.

Speranțele de viitor

Cunoștințele existente în prezent lasă să se întrevadă două metode care pot conduce la realizarea reacției de fuziune automenținută. Una din ele este strîngerea plasmei în cîmpuri magnetice, iar încălzirea ei să se facă prin curenți electrici, care pot circula prin plasmă. Metoda se numește *confirmare magnetică* și stă la baza instalațiilor de tipul Tokamak.

O altă metodă este *cofinarea inerțială* sau *fuziunea laser*, în care căldura necesară reacției se realizează prin focalizarea unor fascicule laser pe pastile de deuteriu+tritiu solid. Raza de lumină laser care lovește pastila aruncă rapid o masivă cantitate de energie încît încălzirea pastilei se face într-un timp foarte scurt. În aceste condiții are loc o rapidă vaporizare a materialului de la suprafață, care pleacă din pastilă, iar restul pastilei este accelerată *spre interiorul* său (implozie). Această „comprimare" duce la o asemenea creștere a densității zonei centrale a pastilei încît creează condițiile de amorsare a reacției termonucleare.

Chiar dacă în multe laboratoare au fost implodate multe pastile din combustibil de fuziune, pînă la construirea unei centrale termonucleare mai este o cale lungă...

Cu toate perfecționările făcute, nu s-a ajuns încă la situația de a obține energie pe seama fuziunii termonucleare în instalațiile de tip „capcană magnetică". Nici instalațiile cu laser nu sînt mai avansate de stadiul experimentelor: trebuie puse la punct pastile cu combustibil eficiente, laseri de putere corespunzătoare și trebuie materiale care să asigure o viață lungă reactorilor.

Se pune firesc întrebarea: este oare rentabilă fuziunea în instalații magnetice, ca fiind cele mai costisitoare (în general

electromagneții uriași)? Răspunsul definitiv nu poate fi dat încă, dar în ultimii ani a fost creată o bază materială suficient de puternică pentru a-l determina. Există programe speciale de cercetare în curs, în U.R.S.S., S.U.A., Japonia și cîteva țări europene care participă la un studiu internațional pentru perfecționarea reactorilor de tipul Tokamak.

Și la noi în țară se fac experiențe și cercetări privind reacțiile de fuziune. Începînd din anul 1978, accentul s-a pus pe cercetarea și construirea de instalații Tokamak.

În orice caz, pînă la sfîrșitul secolului se vor afla multe despre fuziunea termonucleară. Viitorul va decide pe ce cale se va putea ajunge la fuziunea termonucleară controlată: cea a perfecționării instalațiilor sau cea a perfecționării combustibilului, căci există și asemenea direcții de studiu.

Lăsînd la o parte orice controverse, calculul că folosind 10 kg deuteriu pe oră, într-un reactor de fuziune s-ar putea obține 350 milioane de kilovați-oră, și că pentru a obține aceeași energie ar trebui consumate 180 000 t cărbune pe oră, reprezintă o tentație cu greu discutabilă.

Capitolul 10

PARTICULE ELEMENTARE

Statutul de elementaritate

În ultimele decenii ale secolului nostru, dacă descoperirile făcute în domeniul atomului nu au avut spectaculozitatea sfîrșitului de secol al XIX-lea, în schimb partea experimentală a avut o dezvoltare remarcabilă. Cu ajutorul unor instalații de mare complexitate și cu perfecționări continue, cercetătorii au reușit să pătrundă tot mai adînc în microcosmos, descoperind o lume din ce în ce mai complicată, care părea guvernată de legi cu totul diferite de cele cunoscute. Ca de atîtea ori în evoluția fizicii, a fost nevoie nu numai de legi noi, dar și din partea cercetătorilor se impunea un nou fel de a privi lucrurile, de a se obișnui cu noul mod de gîndire necesar înțelegerii fenomenelor.

Fizicianul J.F. Dyson, într-un studiu original asupra modalităților istorice ale diverselor inovații în fizică, ajunge la o concluzie interesantă. După părerea sa, lăsînd la o parte unele excepții, o privire atentă asupra fizicii demonstrează că ar exista o regulă generală: orice mare inovație ajunge să fie încununată cu deplin succes numai după o acumulare treptată de cunoștințe într-o perioadă care acoperă circa 60 de ani. Dintre aceștia, prima etapă, de circa 30 de ani, este durata de trecere de la descoperirea unui fenomen deconcertant pînă la nașterea unei idei noi care poate da explicațiile necesare interpretării. Apoi, alți 30 de ani vor trece din momentul lansării ideii care explică fenomenul pînă cînd sînt deduse cele mai importante consecințe.

Prima etapă ar corespunde unei perioade de cercetări asidue în vederea găsirii unei soluții, iar cea de-a doua perioadă reprezintă ani de sistematizare și asimilare a noilor concepții, inedite și totodată stranii.

Astfel, de la descoperirea inducției electromagnetice de Faraday, pînă la teoria electromagnetică a lui Maxwell au trecut 30 de ani; apoi de aici pînă la demonstrarea existenței undelor electromagnetice de Hertz au trecut alți 30 de ani.

De la descoperirea nucleului atomic de Rutherford pînă la înțelegerea suficient de logică a structurii nucleului și a reacțiilor nucleare au trecut circa 30 de ani; alți 30 de ani au trecut de la elaborarea mecanicii cuantice a lui Heisenberg pînă la teoria supraconductibilității a lui Bardeen...

Desigur, este o apreciere personală a lui Dyson; în știință nu există legi istorice precise și nici nu ar trebui să fie extrapolate eventualele regularități care ar fi observate. Dar chiar dacă nu se acceptă „regula celor 60 de ani", trebuie totuși să fie recunoscut că procesul de „înțelegere" care precede și urmează orice inovație remarcabilă a fizicii este lent și deci de lungă durată. De asemenea, ar trebui recunoscut că munca depusă de cercetători, anonimi sau nume celebre, pentru a asimila o inovație a fizicii după ce evenimentul a avut loc este tot atît de lungă, epuizantă și importantă ca și cea depusă de predecesorii lor care au descoperit fenomenul.

În lumina acestor considerații, ce previziuni se pot face în legătură cu situația particulelor elementare? Pentru a încerca un răspuns, este utilă o trecere în revistă a ceea ce se știe pînă în prezent despre aceste entități ale lumii subatomice.

Ce se înțelege prin particule elementare? Expresia de particule elementare a fost folosită în trecut pentru a indica acele particule care nu par să mai fie compuse din alte entități, mai mici, și care ar putea fi considerate ultimii constituenți ai substanței. În realitate însă, istoria fizicii a demonstrat că statutul de elementaritate care, într-o anumită perioadă a fost atribuit unor particule sau corpusculi, se datora doar limitelor cunoștințelor avute în acel moment.

De aceea, fizicienii și chimiștii din a doua jumătate a secolului trecut credeau că atomul ar fi ultima particulă a substanțelor, care nu mai putea fi descompusă, adică ar fi o particulă elementară. Dar după ce s-a descoperit că, în realitate, atomul este un sistem complex, format dintr-un nucleu și electroni orbitali, noțiunea de elementaritate a fost transferată acestor noi obiecte ale microcosmosului: nucleul și electronii. Mai tîrziu, cînd s-a aflat că și nucleul, la rîndul său, are o structură, fiind format din protoni și neutroni, noțiunea de elementaritate a fost din nou transferată: s-a declarat că electronul, protonul și neutronul sînt particule elementare...

Toate acestea au demonstrat că termenul de „elementar" trebuie înțeles doar în sens istoric, în raport cu nivelul cunoștințelor timpului. Într-un stadiu oarecare al dezvoltării științei, se numesc elementare acele particule care par lipsite de structură, adică nu sînt descrise în funcție de alte entități mai mici. De aceea, pentru toate particulele din lumea atomului ar fi poate mai potrivit numele de particule subatomice sau particule subnucleare.

Spinul

Spre anul 1932, „spectacolul" atomic avea doar patru personaje: electronul, protonul, neutronul și fotonul. Primele trei sînt particulele care fac parte din componența atomului; ele au masă de repaus. Dar fotonul este o cuantă de energie și constituie un exemplu de un tip de particulă cu totul diferit de celelalte trei cunoscute. Fotonul are masă de repaus nulă și fiind purtătorul energiei electromagnetice nu are sarcină electrică.

Dar și particulele cunoscute aveau unele proprietăți care au fost introduse ca urmare a considerațiilor relativiste asociate fizicii atomice.

Pentru a defini una dintre aceste proprietăți, chiar dacă reprezentarea este incorectă și tributară unui model legat de fizica clasică, se consideră că orice particulă subnucleară poate fi imaginată ca o mică sferă solidă (în loc de o abstractă *funcție de undă*). În această accepțiune, pe lîngă alte tipuri de mișcări, particula poate avea o mișcare de rotație în jurul axei sale. În lumea macroscopică există o mulțime de astfel de exemple, de sfere în rotație. Poate cea mai cunoscută este mișcarea de rotație a Pămîntului în jurul axei sale, o dată pe zi.

În descrierea unui astfel de sistem rotațional, fizicienii au definit o mărime pe care au numit-o *moment cinetic*. Acesta este o mărime analoagă *impulsului* întîlnit în mișcarea corpurilor, măsurat prin produsul dintre masa corpului în mișcare și viteza sa. Există o constatare experimentală: impulsul mecanic se conservă; el este asociat tendinței unui corp aflat în mișcare de a-și păstra starea de mișcare pînă asupra sa va acționa o forță exterioară (legea conservării impulsului). Este important să se remarce faptul că legea conservării impulsului (întocmai ca și alte legi de conservare) este doar rezultatul experiențelor. Ea nu reprezintă ceva dedus logic, dintr-un adevăr fundamental, ci doar o concluzie bazată pe experiment.

Strict vorbind, nu se poate spune că impulsul trebuie să se conserve în orice condiții. Se poate doar spune că impulsul mecanic *s-a dovedit că se conservă* sub toate condițiile observate pînă în prezent și în limitele preciziei pe care le permite aparatura actuală.

Poate fi violată legea conservării impulsului? Răspunsul este: se pare că da. Fără îndoială însă că ori de cîte ori se observă un astfel de fenomen, care ar face să fie contestată legea conservării impulsului, fizicienii au mai mult de lucru; fenomenul trebuie studiat cu mai multă atenție și nu de puține ori fenomenul a trebuit să fie interpretat dintr-un asemenea unghi încît să nu constituie o violare a legii. În orice caz, o violare a legii de conservare este greu de acceptat, nu pentru că ar constitui ceva „sacru", ci pentru că s-a dovedit extrem de folositoare fizicii, nefiind contrazisă timp de peste trei secole. Astfel se și explică dorința oamenilor de știință de a o reține cît mai mult timp posibil.

Revenind la particula-sferă în rotație, simplu vorbind, conservarea momentului său cinetic exprimă tendința sa de a-și menține starea de rotație pînă cînd intervine o forță exterioară care să o modifice.

Momentul cinetic al unei particule subnucleare a fost numit *spin*. Conceptul de spin a fost introdus în anul 1925 de Goudsmit și Uhlenbeck, în explicațiile date în legătură cu despicarea unor linii din spectrul atomilor.

De obicei spinul este notat printr-o săgeată; fiind o mărime orientată are modul, direcție și sens. De aceea, pentru a putea defini complet spinul, trebuie specificate modulul, direcția și sensul săgeții care îl reprezintă.

Cele două sfere din figura 26, identice ca mărime, diferă doar prin sensul de rotație. Ele pot fi diferențiate spunînd, de exemplu, că una se rotește în sens orar, iar cealaltă în sens antiorar. Dar este mai convenabil să descriem sensul spinului, prin convenție, cu regula șurubului. Regula spune că *sensul* de înaintare al șurubului va indica sensul spinului.

Particula avînd spin, trebuie să posede și energie, iar energia poate fi absorbită doar în cuante. Din această cauză, spinul unei particule nu poate avea orice valori, ci doar valori care reprezintă numere întregi de cuante de energie.

Valoarea spinului unei particule este extrem de mică în raport cu unităţile de măsură obişnuite, de aceea a fost stabilită o scară specială, în care spinul fotonului a fost luat ca avînd valoarea 1. La această scară, electronul protonul şi neutronul au fiecare spinul 1/2.

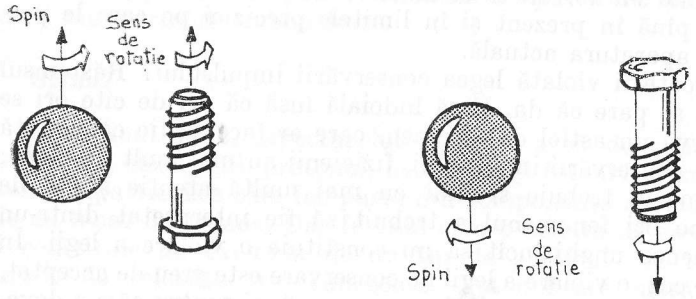


Fig. 26. Spinul şi determinarea sensului cu regula şurubului.

Deci spinul este o proprietate intrinsecă a particulelor subnucleare aşa cum sînt, de pildă, masa şi sarcina electrică. El poate avea doar una din valorile 0, 1/2, 1, 3/2, 2, 5/2, 3, adică ori valori întregi, ori semiîntregi. Spinul nu poate fi, de pildă, 3/4 sau 2/3 sau alte valori intermediare.

Dar mai există o proprietate importantă a particulelor cu spin şi anume spinul poate fi orientat doar în cîteva sensuri bine determinate. Numărul direcţiilor depinde de mărimea acestuia. Pentru particulele cu spinul 1/2 există doar două posibilităţi: „în sus“ şi „în jos“ (adică unul în sens opus celuilalt). Pentru particulele cu spinul 1 există trei orientări: „în sus“, „în jos“ şi „lateral“.

Cu cît spinul creşte, cu atît creşte şi numărul posibil al orientărilor. Formula de calcul este simplă: N (numărul orientărilor)$=2\ J$ (valoarea spinului)$+1$.

Spinul particulei nu dispare în cazul ciocnirilor cu alte particule, iar mărimea spinului poate fi modificată numai prin schimbarea identităţii particulei.

Mişcarea de spin nu există în realitate, dar a fost acceptată, deoarece s-a dovedit utilă în explicarea comportării particulelor.

Toate aceste rezultate, care au fost confirmate experimental, nu sînt altceva decît încă o manifestare a discontinuităţii naturii care se manifestă pregnant în fenomenele atomice. Adică, aşa cum s-a arătat anterior, atomul se poate afla doar într-un anumit număr de stări cuantice sau, altfel spus, energia sa poate avea doar un număr discret de valori, iar acum s-a arătat că spinul unei particule poate avea doar anumite valori discrete şi se poate orienta doar în anumite poziţii. Toate acestea sînt efecte cuantice pe care, în ultimă instanţă, le guvernează constanta lui Planck.

Intervine statistica

Cercetările teoretice şi experimentale au scos la lumină încă multe particularităţi ale lumii subnucleare. Chiar dacă particulele aveau deja cîteva caracteristici cu care puteau fi oarecum descrise, respectiv masa, sarcina electrică şi spinul, s-a stabilit că ele mai posedă o proprietate asociată spinului, anume *statistica*. (Se reaminteşte că, în cazul de faţă, statistica este ştiinţa ce studiază sistemele alcătuite dintr-un număr foarte mare de particule sau fenomene de acelaşi fel, pe baza metodelor de calcul ale teoriei probabilităţilor.)

Proprietatea este în legătură cu principiul de excluziune al lui Pauli, care afirmă că într-un atom fiecare stare cuantică poate fi ocupată doar de un singur electron; cu alte cuvinte, într-un atom poate exista un singur electron care se roteşte în jurul nucleului pe o anume orbită (permisă) şi care are spinul orientat într-un anume sens (dintre cele permise).

Dar de principiul lui Pauli nu ascultă numai electronii, ci toate particulele care au spinul 1/2. Adică, fiind date mai multe particule subnucleare diverse, toate de spin 1/2, doar una singură dintre acestea poate ocupa o anume stare cuantică.

Astfel, electronii, protonii şi neutronii, care au spinul 1/2, se supun principiului excluziunii. În acest caz se spune că particulele se supun *statisticii Fermi-Dirac* şi sînt numite *fermioni*.

În schimb, toate particulele care au spinul zero sau un număr întreg (cum este, de pildă, fotonul, care are spinul 1), acestea nu „ascultă“ de principiul de excluziune. Despre ele

se spune că se supun *statisticii Bose-Einstein* și sînt numite *bosoni*.

Aceste considerații asupra spinului și a statisticilor, prezentate aici doar enunțiativ și pe care numai calculele matematice le-ar putea face convingătoare și necesare, vor fi folosite pentru a trece în revistă diversele particule subnucleare descoperite și de a încerca o sistematizare a lor. Mai trebuie reținut că împărțirea particulelor subnucleare în cele două categorii, de fermioni și bosoni, prezintă o importanță fundamentală, fiind vorba de două categorii de entități dotate cu proprietăți esențial diferite.

Tot în vederea unor sistematizări, particulele subnucleare au fost împărțite, în funcție de masa lor, în două categorii: *leptoni* (ușoare) — electronul și pozitronul — și *barioni* (grele) — protonul și neutronul.

Capitolul 11

COMPLICAȚIILE MICROCOSMOSULUI

Încep surprizele

Ce frumos era totuși pentru fizicieni anul 1932. Atunci Universul părea să aibă la bază doar trei particule elementare, care făceau parte din componența atomului: electronul, protonul și neutronul. Dintre antiparticule era cunoscut pozitronul sau antielectronul, ceea ce presupunea existența antimateriei. Astfel, prin simetrie, se preconiza existența antiprotonului și antineutronului, fără a se ști exact cum să fie puse în evidență.

Surpriza a venit însă înainte de descoperirea celor două antiparticule preconizate. Nenumărate experiențe făcute în laboratoare au semnalat o adevărată avalanșă de noi particule, care de care mai ciudate, puse în evidență de instalațiile de cercetare.

Astfel, dintr-o dată, lumea microcosmosului a început să se complice. Noile particule nu mai erau „cuminți", ele păreau elementare, dar modul lor de existență nu se supunea unor legi cunoscute. A început o adevărată vînătoare de particule, iar contabilizarea lor a dus aproape la epuizarea alfabetului grecesc, cu care erau notate. Apărea tot mai evidentă necesitatea introducerii unei ordini în ceea ce s-ar putea numi „jungla microcosmosului".

Dar să urmărim desfășurarea evenimentelor...

Fizicianul P.A.M. Dirac, ca o consecință a teoriei sale asupra electronului, a dedus posibilitatea existenței unui electron cu sarcina +1, adică a unui pozitron (sau antielectron), particulă observată pentru prima dată de C. Anderson, după cum s-a arătat anterior, în radiația cosmică. Un pozitron și un electron apar în perechi, ca rezultat al transformării a doi fotoni gama, și viceversa, dacă un pozitron se ciocnește cu un electron se anihilează, generînd doi fotoni gama.

Deoarece teoria lui Dirac se referă la particulele cu spinul 1/2 (fermioni) și deoarece protonul și neutronul sînt și ei

P.A.M. Dirac

fermioni, desigur se putea ușor magina că pentru fiecare dintre aceste două particule „grele" ar trebui să existe antiparticule corespunzătoare. Dar confirmarea experimentală avea să vină destul de tîrziu; antineutronii și antiprotonii au fost observați abia în 1955, în înregistrările Laboratorului din Berkeley.

Aici merită menționat fizicianul Ion Plăcințeanu (1893—1966), care, ca profesor la Universitatea din Iași, a emis ipoteza existenței antiprotonilor înaintea previziunii făcute de G. Gamow. I. Plăcințeanu a studiat, din 1921, cu fizicieni celebri ca Planck, Einstein, M. von Laue, Nernst, Born, Heisenberg ș.a., iar teza sa de doctorat privind interacțiile dintre radiație și atomi cuadrupolari a fost o contribuție originală la fizica atomului.

În anul 1938, Neddermeyer și Anderson au comunicat că au descoperit o nouă particulă, cu masa de 210 ori mai mare decît a electronului. Ei au numit noua particulă mezotron (de la cuvîntul grecesc mezo = mediu), devenită mai tîrziu *mezon*, și a fost notat cu litera grecească miu (μ). De aceea, în prezent este numită *mezon miu* sau, mai simplu, *miuon*.

De fapt, au fost doi miuoni: unul cu sarcină pozitivă, altul cu sarcină negativă, dar ambii aveau aceeași masă.

Erau oare acestea particulele preconizate de Yukawa și Proca, adică particulele purtătoare ale forței nucleare?

Cercetări asidue i-au convins pe fizicieni că se află într-adevăr în fața unui mezon, dar cel descoperit nu era mezonul preconizat a fi purtătorul forței nucleare. El nu era stabil și se comporta ca un neutron, dezintegrîndu-se într-un electron și doi neutrini, avînd o durată mijlocie de viață de 10^{-6} s. În apropierea nucleului ei nu interacționează tare, deci nu poate fi vorba de a fi purtători ai forței nucleare tari.

După ce identitatea noii particule a fost stabilită, în 1947, fizicianul I. Rabi ar fi exclamat: „Cine l-a comandat?" — exprimînd prin aceasta sentimentele de deconcertare ale grupului de fizicieni.

În anul 1948, un grup de cercetători englezi, condus de fizicianul Cecil F. Powel, și-a publicat rezultatele studierii emulsiilor expuse radiațiilor cosmice, pe vîrful muntelui Pic du Midi, din Franța. Surpriza lor a fost mare cînd au descoperit, pe lîngă cunoscutele urme ale miuonilor, că ciocnirile unor particule energice cu nucleele au produs un alt tip de mezon, care era mai greu decît miuonul. Noul mezon interacționa tare cu nucleele întîlnite, „spărgîndu-le" și generînd jerbe de debriuri.

Noua particulă a fost numită mezon pi (π) sau pion. Întrucît pionul s-a dovedit a juca rolul fundamental de a lega nucleonii și a ține nucleul „strîns grămadă", el a devenit în foarte scurt timp obiectul unor studii intense. Curînd s-a constatat că pionul apare în trei varietăți: pionul pozitiv (π^+), avînd sarcina electrică $+1$, pionul negativ (π^-), avînd sarcina electrică -1 și pionul neutru (π°). Masa pionilor cu sarcină electrică este de 273 de ori mai mare decît a electronului și se dezintegrează într-un miuon + neutrin în 10s, iar masa pionului neutru este de 265 de ori mai mare decît a electronului și se dezintegrează în doi fotoni, în 10s.

Chiar dacă în anul 1948 enigma mezonilor a fost oarecum dezlegată, mai rămîneau multe întrebări. Dacă existența pionilor era inevitabilă, jucînd rolul esențial în agregatul numit nucleu, existența miuonului era încă un caz ciudat. Pe lîngă faptul că a mărit „colecția" particulelor subatomice, nu se vedea ce rol ar putea juca în „spectacolul atomic". Nici pînă în prezent nu poate fi găsită o rațiune pentru care natura a creat acest „electron greu", un fermion de peste 200 de ori mai greu decît electronul, dar avînd aceeași sar-

cină electrică, egală cu *e*. Existența miuonilor reprezintă și în prezent o enigmă a naturii...

Dar evenimentele se precipitau în grupele de cercetători, preocupați în primul rînd de perfecționarea continuă a metodelor și instalațiilor de investigare. O astfel de instalație modificată a fost și cea constituită simplu prin introducerea unui perete despărțitor din plumb, într-o cameră cu ceață, pentru a încetini particulele de mari energii din componența radiațiilor cosmice. Experiențele făcute cu o astfel de cameră cu ceață, la înălțimile pe care le permiteau vîrfurile munților au scos la iveală înregistrări surprinzătoare. De pildă, pe multe plăci cu emulsie fotografică, pe lîngă alte urme, au fost observate și o serie de furci în formă de lambda (Λ) și anume în acea parte a camerei cu ceață care era „după" trecerea prin ecranul de plumb a particulei incidente. Singura interpretare posibilă (ca și în cazul „furcilor" produse de neutroni) era că în stratul de plumb a fost creată o particulă neutră care, în punctul unde apărea „furca" se dezintegra.

Noua particulă a fost numită lambda-zero (Λ^0), iar ulterior s-a arătat că cele două ramuri ale „furcii" erau produse de un proton și un pion negativ.

Parcă anume pentru a complica și mai mult lucrurile, în același timp, în anul 1947, a mai fost detectat un grup de alți mezoni, de asemenea în înregistrări produse de radiațiile cosmice. Acești nou veniți au fost numiți mezoni K, sau kaoni, și ei apar în două perechi, fapt nemaiîntîlnit pînă acum. O pereche este constituită dintrun kaon pozitiv și un kaon neutru, iar altă pereche conține un kaon negativ și un antikaon neutru.

Dar nu numai apariția în scenă a grupurilor de mezoni i-a deconcertat pe fizicieni, ci unele aspecte stranii în comportarea lor. Este vorba de interacțiile lor cu alte particule.

Interacțiile și stranietatea

Vorbind despre interacții, la nivelul cunoștințelor timpului respectiv, se cunoșteau trei procese fundamentale pe care le sufereau particulele subnucleare: interacția nucleară (Yukawa), interacția electromagnetică (Dirac) și dezintegrarea beta (Fermi). Aceste trei procese diferă enorm între ele din punctul de vedere al intensității. Astfel, procesul de interacție nucleară, care este asociat forțelor extrem de intense

ce leagă nucleonii din nucleul atomic, este o *interacție tare*. Forța electromagnetică este de circa 140 de ori mai slabă decît forța nucleară, iar interacția care intervine în dezintegrarea beta este deosebit de mică față de cele două precedente (de circa 100 de miliarde de ori mai mică decît interacția tare); este ceea ce se numește o *interacție slabă*

Interacțiile tari sînt cele mai rapide posibil: de pildă, emisia și absorbția unui pion are loc în circa 10^{-23} s, un timp greu de imaginat. Pentru o oarecare orientare este suficient să constatăm printr-un calcul simplu că lumina, care are viteza de 300 000 km/s ar parcurge în 10^{-23} s, un spațiu egal cu... diametrul unui nucleu atomic (10^{-15} m) — altă dimensiune greu de imaginat.

Procesele electomagnetice sînt de circa 140 de ori mai lente, iar interacțiile slabe au o viteză de desfășurare de circa o miliardime de secundă (10^{-9} s).

O comparație interesantă între forța tare și forța slabă: dacă interacția tare s-ar desfășura pe o anume scară a timpului în o secundă, atunci interacția slabă ar trebui să dureze circa... un milion de ani!

Revenind la particulele lambda și la kaoni, după studierea proprietăților lor s-a arătat că particula lambda este un fermion (spin 1/2), are o masă de circa 2 180 ori mai mare decît cea a electronului și procesul de formare este de tipul interacției tari. Kaonii, în schimb, sînt bosoni (spin 0) și au masa de circa 1 000 de ori mai mare decît cea a elctronului și procesul de formare a lor este, de asemenea, de tipul interacției tari.

Surpriza a venit o dată cu studierea procesului de dezintegrare a acestor noi particule, cînd a apărut o situație „stranie". Anume, particulele se formează prin interacții tari, adică cu o viteză de circa 10^{-23}s. Potrivit principiului reversibilității ele ar trebui deci să se dezintegreze cu o viteză de același ordin de mărime. Dar lucrurile nu stau deloc așa; deși posedă energii mari, deci mari posibilități, ele se dezintegrează într-un timp relativ lung, care durează 10^{-8}—10^{-9} s, deci un timp caracteristic interacțiilor slabe.

Astfel, noile particule au o viață de 100 000 de miliarde de ori mai lungă decît timpul pe care l-ar putea sau ar trebui să-l trăiască. Or, această comportare este deosebit de stranie,

chiar atît de stranie încît nici nu este de mirare că particulele de acest tip au fost numite *particule stranii*, iar proprietatea lor a fost numită *stranietate*.

Rezonanțe

Timp de cîțiva ani fizicienii au contemplat „neputincioși" stranietatea... *particulelor stranii*. Între timp au fost acumulate noi rezultate care au complicat și mai mult lumea particulelor subnucleare.

Începînd cu anul 1952, un grup de fizicnei, condus de E. Fermi, au început să înregistreze rezultatele împrăștierii fasciculelor de pioni pe protoni, în hidrogen. Concluzia la care au ajuns cercetătorii a scos la iveală o mare probabilitate de ciocniri între pioni și protoni (nucleele de hidrogen), pentru anumite energii ale pionilor. Adică, se poate accepta că la aceste valori ale energiilor, pionii și protonii se pot „uni" pentru o scurtă perioadă, în timp ce pentru alte energii ei doar ricoșează. Dacă lucrurile stau așa, starea „înlănțuită" a pionului cu protonul poate fi privită ca o adevărată particulă, neexistînd deosebiri esențiale față de o astfel de entitate.

Aceste particule, rezultate ale „înlănțuirii", care sînt de fapt stări legate (stări care se formează într-un moment al ciocnirii, înainte de starea finală), au primit numele de *rezonanțe*.

Rezonanțele au o viață medie extrem de scurtă (10^{-19}—-10^{-23} s), după care se despart din nou în particulele componente, în cazul de față pion și proton. Acest tip de rezonanță a fost notat cu litera grecească delta (Δ), și pentru că ar trebui să aibă două sarcini pozitive, sînt numite delta-plus-plus (Δ^{++}).

S-a constatat că rezonanțele apar în două tipuri de procese: pion-nucleu (tip mezonic) și kaon-nucleon (tip barionic). Din cauza timpului lor mediu de viață extrem de scurt, ele sînt sub limitele de investigație directă, iar existența lor este dedusă doar din studiul comportării particulelor rezultante.

Au fost alcătuite tabele de rezonanțe, în care acestea sînt prezentate sub formă de familii. Depildă, pentru rezonanța delta există patru stări: delta-plus-plus,delta-plus, delta-zero și delta-minus. Și cîte alte rezonanțe, atît barionice cît și mezonice nu au mai fost catalogate!

Pot fi considerate rezonanțele drept particule? Răspunsul poate fi da sau nu...

Deconcertarea fizicienilor vine și de la faptul că particulele subnucleare cunoscute ca atare prezintă, la rîndul lor, stări excitate, adică stări cuantice diferite, prin care se deosebesc de stările fundamentale. Oare aceste stări pot fi admise ca particule diferite? Răspunsul este același ca mai sus: da și nu...

Stranietate dublă și legile de conservare

Dar aceasta nu este încă imaginea completă a „junglei microcosmosului". De pildă, în anul 1953 a fost identificată o nouă particulă, care a fost numită *sigma* (Σ). De fapt, există o familie sigma, cu trei membri: sigma-plus, sigma-minus și sigma-zero ($\Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0$).

Particulele sigma care au sarcini electrice (sigma-plus și sigma-minus) se dezintegrează într-un nucleon și un pion, în 10^{-10} s, iar cea neutră (sigma-zero) se dezintegrează ceva mai repede, într-o particulă lambda și un foton.

Întocmai ca și particula lambda, particula sigma a fost neașteptată și nici ea nu pare să joace un rol important în fizică.

Descoperirile din „junglă" continuă însă: în anul 1954, de asemenea într-o înregistrare a radiațiilor cosmice, a fost descoperită particula „cascadă", numită astfel deoarece se dezintegra în 10^{-10} s într-o particulă lambda și un pion, apoi particula lambda se dezintegra într-un pion și un nucleon. Particula „cascadă" a fost numită *particula xi* (Ξ) și apare ca o familie cu doi membri: xi-minus și xi-zero.

Și în cazul particulei xi este întîlnită stranietatea... dar de două ori: ea se dezintegrează slab generînd o particulă lambda și aceasta de asemenea se dezintegrează slab. Deci particula xi prezintă o *stranietate dublă*.

Stranietatea poate fi deci considerată ca o calitate a particulelor subnucleare, care le afectează timpul de viață. Ea are o oarecare asemănare cu sarcina electrică, în sensul că este aditivă, dar se deosebește de aceasta prin faptul că nu poate „trăi" mult timp și nu se conservă în procesele slabe.

Pentru a putea fi vehiculată, s-a convenit ca stranietatea unei particule să fie exprimată numai prin numere întregi (pozitive sau negative). Funcție de această convenție, toate particulele nestranii (protonul, neutronul, antiprotonul, antineutronul, pionul etc.) au *stranietatea zero*. Particula lambda are stranietatea −1, iar antilambda +1; kaonul are stranietatea +1, iar antikaonul −1.

O dată introdusă noua mărime, stranietatea, se poate arăta că ea trebuie să se conserve în interacțiile tari și în cele electromagnetice. Adică, în oricare din aceste interacții stranietatea totală a particulelor care intră în reacție (definită ca suma algebrică a stranietății particulelor luate separat) trebuie să fie egală cu stranietatea totală a produselor reacției.

Dar în interacțiile slabe stranietatea nu se conservă. De ce? Întrebarea ar mai putea fi completată cu o alta: de ce sînt interzise reacții tari în care să fie inclusă o singură particulă stranie?

Fizicienii știu că în natură multe lucruri sînt „interzise". De pildă, este interzis ca o bilă de biliard să lovească o altă aflată în repaus și ca rezultat ambele bile să rămînă în repaus. Cine interzice? Legea conservării energiei! La fel în chimie: este interzis ca masa totală a produselor unei reacții chimice să fie mai mare decît masele separate ale substanțelor care au luat parte la reacție. Interzicerea se datorează legii conservării masei (în domeniul nerelativist!). Aceste legi de conservare reprezintă pentru fizicieni o importantă sursă de încredere și ei le apără „cu îndîrjire" ori de cîte ori „par" în pericol...

Și în cazul proceselor stranii acționează o lege, găsită independent de fizicienii M. Gell-Mann și K. Nishijima: legea conservării stranietății. Această lege impune un concept numit *generarea de perechi*.

Totul a pornit de la sugestia fizicianului Pais, că interacția tare nu dă niciodată naștere la o singură particulă stranie (o singură lambda sau un singur kaon), ci totdeauna la două sau mai multe din acestea, de pildă, o particulă lambda și un kaon *împreună*. Dar aceste două particule nu pot să reacționeze între ele prin interacții tari, neavînd energie suficientă. Ar însemna ca produsele lor de descompunere să aibă masa totală mai mare decît masele lor! Deci, neavînd această posibilitate de a interacționa tare, cele două (sau mai multe) particule stranii, abia născute, se vor îndepărta una de alta,

continuînd să trăiască, pînă cînd, după un timp relativ lung (circa 10^{-9} s) se dezintegrează printr-o reacție slabă.

Această ipoteză, a generării de perechi, a fost confirmată de experiență în sensul că niciodată nu a fost observat vreun proces al cărui rezultat ar fi producerea unei singure particule stranii. De aici s-a ajuns la elaborarea legii de conservare a stranietății în interacțiile tari și electromagnetice.

Particulele stranii, generate în perechi potrivit legii conservării stranietății în interacțiile tari, își au originea în particulele obișnuite, fără stranietate. Adică, deoarece particulele care interacționează tare au stranietatea zero, atunci, conform legii de conservare, stranietatea totală a produselor trebuie să fie, de asemenea, zero. Or, acest bilanț înseamnă că niciodată nu poate fi produsă o singură particulă cu stranietatea diferită de zero, ci, după cum s-a mai amintit, trebuie să fie produse cel puțin două, astfel încît suma algebrică a stranietăților să fie zero. În exemplul dat, de producere a unei particule lambda și un kaon, prin ciocnirea unui proton cu un pion, acest bilanț are loc deoarece particula lambda are stranietatea −1, iar kaonul +1 (−1+1=0).

În concluzie, ipoteza generării de perechi explică de ce particulele stranii nu se descompun prin interacții tari. Se poate arăta, de altfel, că legea conservării stranietății nu le permite acestor particule nici descompunerea prin interacții electromagnetice. Astfel că, particulele stranii nu se pot dezintegra în particule obișnuite decît în timpul caracteristic interacțiilor slabe, pentru care nu este valabilă legea conservării stranietății.

Simetria în natură

Mai există o serie de principii care au condus la legi de conservare, însă acestea sînt mai puțin importante în procesul de clasificare al noianului de particule; în schimb ridică o serie de probleme deosebit de delicate pentru fizicieni... dar și pentru filozofi.

Un astfel de principiu este cel al parității, care a dus la legea conservării parității; aceasta privește imposibilitatea de a distinge stînga de dreapta. Cu aproximație, poate fi enunțată astfel: „nu există nici o deosebire absolută între un obiect (sau un eveniment) real și imaginea sa în oglindă".

Pînă în anul 1956, teoria și experiența au arătat că legea conservării parității este respectată în orice sistem fizic izolat. Dar doi tineri cercetători, Lee Tsung Dao și Yang Chen Ning, au arătat că în cazul interacțiilor slabe stînga și dreapta pot fi distincte.

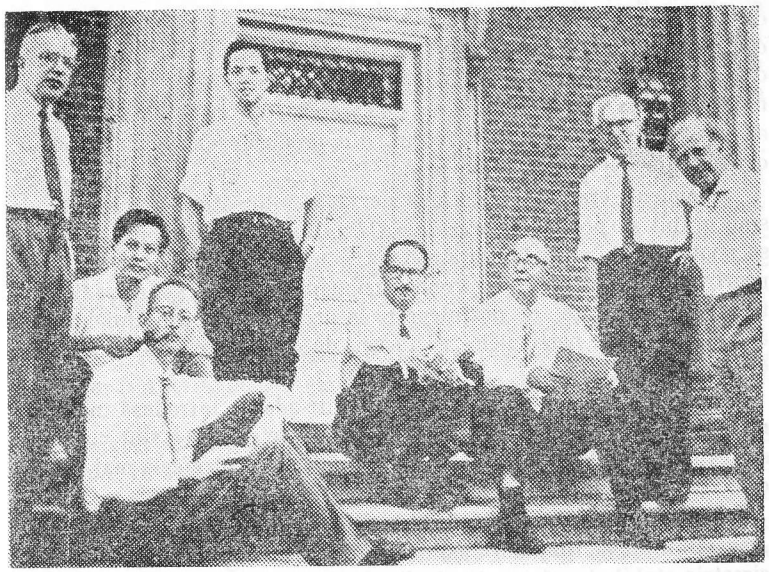
Fizicienii nu au acceptat ușor contestarea validității legii conservării parității dar, cu toate speranțele cercetătorilor, experiențele i-au confirmat invaliditatea, demonstrîndu-se o prevalență pentru „stînga". Astfel că valabilitatea principiului conservării parității era considerată falsă; pe cît era de valid principiul în alte zone, el nu era valid în zona interacțiilor slabe. La cîteva zile după confirmarea invalidității legii, Pauli scria: „... Sînt tulburat nu atît pentru că natura preferă mîna stîngă, cît despre faptul că este simetrică stînga-dreapta atunci cînd „se exprimă" tare"...

Violarea simetriei. Noțiunea de simetrie este profund ancorată în fiecare din noi. Pînă la un astfel de punct încît nu ezităm să calificăm drept „strîmb" un obiect care nu respectă acest principiu. Ori, mai precis, într-un domeniu atît de „sobru" ca fizica, atît de solid structurată prin legi, există un anumit număr de fenomene „strîmbe". Explorarea naturii, împinsă pînă în intimitatea materiei, studiul particulelor subnucleare, au arătat că simetria este uneori violată și că natura, la rîndul ei, are o „dreapta" și o „stînga".

Numeroase obiecte naturale, dar și artificiale, există sub două forme echivalente: forma dreaptă și forma stîngă. De pildă, există mînă dreaptă și mînă stîngă. Or, o mînă dreaptă văzută în oglindă devine o mînă stîngă și reciproc. Cele două mîini, desigur, nu sînt identice, dar sînt simetrice. Adică, în ciuda asemănării lor, nu încap în aceeași mănușă. Se mai poate spune că pentru orice corp care nu admite plan de simetrie există o imagine în oglindă, diferită ca orientare.

Această simetrie între dreapta și stînga a fost numită de fizicieni „simetrie de paritate" (simbolizată prin litera P = parity = paritate). Totodată au enunțat principiul că natura nu face nici o distincție între dreapta și stînga. Aceasta înseamnă că faptul de a indica un anumit sens ca „dreapta", iar sensul opus ca „stînga" nu este decît o simplă convenție umană, dar că, în natură, această opoziție nu ar exista.

În anul 1956, fizicienii Lee și Yang au spulberat această „credință", demonstrînd că la scara atomică natura, ca și omul, face distincție între stînga și dreapta.



O întîlnire amicală între fizicieni. De la stînga: E Segrè, C.N. Yang O. Chamberlain, T.D. Lee, E. McMillan, C.D. Anderson, I.I. Rabi, W. Heisenberg.

Rămînea însă o simetrie fundamentală, intitulată „de conjugare a sarcinii" sau „de schimbare a semnului sarcinilor" (simbolizată prin litera C = charge = sarcină electrică). În limbajul fizicienilor, aceasta vrea să spună că la toate particulele existente în natură le corespund antiparticule, care nu diferă de primele decît prin sarcina electrică (și cîteva proprietăți analoage) de valoare opusă. Și că această lume a antimateriei — adică cea compusă din antiprotoni, antineutroni și antielectroni — corespunde perfect simetric cu propria noastră lume, posedă aceleași proprietăți, ascultă de aceleași legi.

Dar nu a trecut mult timp și s-a aflat că această simetrie, între particule și antiparticule, este, de asemenea, violată. De atunci, marile principii fundamentale au pierdut mult din „fundamentalitatea" lor și în sufletele fizicienilor a început să se strecoare îndoiala. Unde o să ajungem cu cunoașterea Universului, dacă legile cunoscute de noi, care îl guvernează par „să aibă capricii?" Nu ar trebui oare să fie regîndite toate fundamentele fizicii și să fie rescrise toate ecuațiile?

Din fericire, cîteva observații experimentale au venit să restabilească situația și să-i liniștească pe fizicieni. S-a constatat, de fapt,

că antimateria se comportă exact ca opusul materiei în ce privește dreapta și stînga; dacă de pildă, o particulă arată o preferință pentru dreapta, antiparticula sa are o preferință pentru stînga. Deci, combinînd paritatea *(P)* și conjugarea de sarcină *(C)*, ar trebui să găsim o adevărată simetrie. Adică, să facem, din produsul celor două asimetrii, o nouă simetrie, simbolizată prin *CP*.

Fizicienii erau foarte fericiți de noua întorsătură a lucrurilor și s-au grăbit să proclame *invarianța CP*. Din nou totul a fost cum nu se poate mai bine în lumea simetriei, pînă la apariția unor noi „nori negri", în anul 1963. În acea vreme, fizicienii Val Fitch și James Cronin, făcînd o experiență de dezintegrare la acceleratorul din Brookhaven, au descoperit că particulele „își făceau de cap", nerespectînd simetria *CP!*

De data aceasta, asimetria a fost într-adevăr introdusă în fizică; nu mai rămînea decît să se tragă consecințele. Acestea sînt cel puțin surprinzătoare, deoarece atacă direct o noțiune dintre cele mai uzuale, cele mai familiare, dar totodată cele mai dificile: timpul.

De fapt, există și o a treia simetrie (și ultima) fundamentală, zisă „reversibilitatea timpului" (simbolizată T = time = timp). Această simetrie stabilește că, pentru legile fundamentale, trecutul și viitorul sînt la fel (nu se deosebesc): adevărul unei formule nu se schimbă dacă se modifică sensul timpului. Se mai poate spune că operația T constă în înlocuirea stărilor inițiale (ale particulelor de intrare într-o anume interacție, de diferite energii și momente) cu stările finale (ale particulelor de ieșire). Adică, interacția a două particule, A și B, care conduce la particulele rezultante C și D, este pusă în relație cu un proces invers, în care C și D sînt particulele de intrare, iar A și B sînt de ieșire. O teorie este consistentă cu T dacă elementele celor două procese sînt identice, ceea ce corespunde imposibilității de a distinge stările inițiale de cele finale.

Există, de asemenea, o teorie capitală, numită *CPT*, după care legile fizicii rămîn aceleași prin aplicarea conjugată a celor trei simetrii fundamentale. Altfel spus, ecuațiile rămîn valabile dacă se inversează toate orientările, dacă se schimbă semnele tuturor sarcinilor particulelor și dacă se inversează sensul de curgere a timpului.

Era clar că repunerea în discuție a unei astfel de teoreme însemna zdruncinarea întregului edificiu al fizicii. Or, într-adevăr, una din implicațiile esențiale ale descoperirii lui Fitch și Cronin este punerea în cauză a validității teoremei *CPT*. Pentru a o salva există o soluție simplă: să se pornească din momentul în care simetria *CP* se arată inexactă, T devine implicit eronat și simetria prin reversibilitatea

timpului nu mai este respectată de natură mai mult decît simetriile P și C. Ce consecință se trage? Că este imposibil să se întoarcă timpul înapoi. Sau, mai exact, dacă se întoarce timpul înapoi — ceea ce este totdeauna posibil într-o ecuație — nu se va mai ajunge niciodată la punctul de plecare.

Concluzia poate fi ilustrată printr-un exemplu din viață. Să considerăm, de pildă, un măr căzut dintr-un pom și să presupunem că ne întoarcem în timp; ar trebui să vedem, într-un proces perfect simetric (ca într-un film rulat invers!), acest măr ridicîndu-se în aer și revenind pe ramura sa, unde a fost agățat. Dar dacă simetria prin reversibilitatea timpului nu există, atunci mărul va lua drumul pomului, dar nu este deloc sigur că el va mai ajunge pe ramura de unde a căzut. Sau, în alți termeni, dacă procesele fizice ar putea fi reproduse în trecut, unele vor fi diferite de cele care au fost atunci cînd au avut loc în realitate.

Desigur, această descoperire nu afectează cu nimic viața noastră cotidiană; în schimb, ea este pasionantă pentru astrofizicieni. Acum, după o teorie cea mai general admisă, Universul a fost născut dintr-o „explozie inițială" („Marea explozie" sau „Big Bang"), urmată de o expansiune a întregii materii create astfel (stele, galaxii, molecule interstelare etc.), care s-a încetinit progresiv. Pînă acum se credea că acest proces de încetinire se va sfîrși prin a pune un termen expansiunii, și că Universul va reveni pe drumul înapoi, contractîndu-se în același nucleu primordial. Dacă se ține însă seama de concluziile logice ale descoperirii lui Fitch și Cronin, că dacă se inversează mișcarea unui sistem fizic, el nu revine nicidecum la poziția sa inițială, atunci se pare că expansiunea Universului nu trebuie să se oprească și că un fenomen care a avut loc în trecut nu are replică în viitor.

Nu se poate oare atribui această idee lui Heraclit care, acum 25 de secole, a spus: „nu te poți scălda de două ori în același fluviu"?

Aceste evenimente, de limitare a unor legi fundamentale, au constituit o lecție gravă pentru fizicieni. În domeniul interacțiilor slabe nu acționează nici legea de conservare a stranietății și nici legea de conservare a parității. În schimb pare că este încă valid principiul conservării energiei. Dar s-ar putea, pe viitor (cine știe?), să se constate că în cazul unor interacții mult mai slabe (cum ar fi, de pildă, cele care intervin în cazul gravitației) să nu mai fie validă nici legea conservării energiei. În acest caz nu ar apărea de loc fantastică teoria cosmogonică susținută de astronomi (F. Hoyle), că

în Universul în expansiune există o continuă generare de materie...

Cercetările, teoriile și descoperirile din domeniul particulelor subnucleare au avut și vor avea încă urmări incalculabile în concepția asupra constituției Universului: fizica microcosmosului și cosmogonia vor rămîne în continuare în strînsă colaborare.

Referindu-se la legile de conservare, fizicianul W. Morrison a spus: „Descoperirea limitelor principiilor de conservare și de stranietate nu reprezintă o renunțare descurajantă, ci o șansă favorabilă. Am intrat și trăim într-o perioadă extrem de fierbinte".

O apariție neașteptată: neutrinul miuonic

Problema interacțiilor slabe a devenit repede centrul de preocupări al fizicienilor fie teoreticieni, fie experimentatori. Un astfel de proces are loc în cazul dezintegrării beta a nucleelor radioactive. În reacție sînt emiși neutrini, care și ei pot produce reacții nucleare. În prezent se știe că în afară de neutrini există și antineutrini și acum se poate preciza că transformarea unui proton în neutron se face astfel: un antineutrin este absorbit de un proton, care se transformă într-un neutron cu emisia unui pozitron.

Succesele obținute în experimentele de reacții nucleare în care intervin neutrini au stîrnit interesul fizicienilor pentru studierea mai aprofundată a acestor fenomene. În special s-au urmărit acele reacții în care intervin neutrini de mare energie, emiși în dezintegrarea unor particule instabile produse în marile acceleratoare.

Munca cercetătorilor a fost curînd răsplătită cu o descoperire de mare importanță. În primele luni ale anului 1962, folosind antineutrinii produși de dezintegrarea pionilor pozitivi, a fost pus în evidență un tip de reacție a antineutrinului cu protonul, dar cu totul diferită în ce privește particulele de ieșire: s-a obținut un neutron și un miuon pozitiv. Reacția a arătat că neutrinii emiși în dezintegrarea beta diferă de neutrinii emiși în dezintegrarea pionilor; sînt specii diferite. De aceea unul se numește neutrin (și antineutrin) electronic, iar celălalt neutrin (și antineutrin) miuonic.

Acest nou aspect fundamental al naturii, care pînă acum s-a sustras observațiilor, a deschis un capitol al fizicii dedicat

neutrinului. Și nu va trece mult timp, că noul capitol al fizicii avea să treacă în inventarul său încă un tip de neutrin, diferit de cele cunoscute...

Sarcină electrică și sarcină barionică

Imaginea pe care o aveau fizicienii asupra lumii particulelor subnucleare era încă destul de complicată și departe de o sistematizare. Pe lîngă contabilizarea mulțimii de particule care apăreau „în avalanșă", mai erau o serie de întrebări ce trebuiau lămurite. De pildă, problema neutronului. Faptul că și el are o antiparticulă — antineutronul — a dus la concluzia că „antiparticulele" nu pot fi caracterizate doar prin a avea sarcini electrice de semne opuse „particulelor"; ci trebuie să existe o altă mărime fizică, caracterizată prin aceea că poate prezenta valori absolute egale, dar de semne opuse — pentru particule și pentru antiparticulele corespunzătoare.

Dar de această problemă sînt legate și unele considerații... cosmice. Materia în Univers există de miliarde de ani, adică electronii, protonii și neutronii care o compun sînt entități stabile. Or, această stabilitate poate stîrni uimire (chiar dacă, după cum se va vedea în secțiunile următoare, în prezent este contestată!). De pildă, se poate pune întrebarea: o dată ce masa și energia sînt echivalente, de ce electronul a rămas același, de miliarde de ani și nu s-a transformat spontan într-un neutrin și un foton? Ori, de ce un proton nu se transformă într-un pozitron (care are aceeași sarcină electrică, dar o masă mult mai mică), diferența de masă fiind regăsită în energia cinetică a pozitronului?

Întrebările nu au ca răspuns imediat decît ideea că, probabil, există legi de conservare care interzic aceste transformări.

Primul „interogat" este electronul. El este cea mai ușoară particulă care are sarcină electrică. Potrivit legii de conservare a sarcinii electrice, aceasta nu poate fi creată sau distrusă.

Conservarea sarcinii electrice. Întocmai ca masa și spinul, sarcina electrică este una din proprietățile fundamentale ale particulelor elementare. Prin faptul că posedă unitatea de sarcină electrică, electronilor li se asociază un număr cuantic — *numărul leptonic.*

Sarcina electrică este remarcabilă din mai multe puncte de vedere. Ea este cuantificată în unități de sarcini electronice. Neutralitatea atomilor, implică faptul că valoarea sarcinii electrice a protonului și cea a electronului sînt egale în modul, cu o aproximație covîrșitoare, de 1 la 10^{19}, adică pînă la a 19-a zecimală! De asemenea, $\gamma \rightarrow e + \bar{e}$, s-a verificat cu precizia de $10^{-20}e$.

Sarcina electrică pare să se conserve, adică sarcina netă a Universului nu se schimbă cu timpul. Această lege a fost testată recent, la nivele de sensibilitate extrem de înalte.

Legea conservării sarcinilor electrice (sau a conservării numărului leptonic) decurge și din ecuațiile electromagnetice stabilite de Maxwell. Astfel se mai poate spune: conservarea sarcinii electrice este o consecință a invarianței cîmpului electromagnetic sub o transformare de etalonare de prima speță.

Fără îndoială, validitatea oricărei legi fizice trebuie să fie continuu testată experimental. Rolul experimentului este de a verifica teoria pe de o parte, iar pe de altă parte, atunci cînd apar fenomene ce nu pot fi explicate, o solicită pentru elaborarea unor noi teorii, mai perfecționate.

Singura posibilitate pe care ar avea-o electronul pentru a dispărea, adică să treacă în formă de fotoni, este anihilarea sa atunci cînd întîlnește un pozitron. Această anihilare nu este interzisă de legea conservării sarcinii electrice, deoarece pozitronul are o sarcină egală, dar de semn opus cu cea a electronului. În felul acesta sarcina totală a sistemului electron + pozitron este zero înainte de anihilare și de asemenea este nulă după anihilare: fotonii care au apărut în urma anihilării nu posedă sarcină electrică.

Stabilitatea electronului ar fi astfel asigurată.

În cazul protonului însă, situația este mai complicată. De la bun început, pe baza observațiilor, se pare că pentru a-i explica stabilitatea nu este suficient principiul conservării sarcinii electrice. Din acest punct de vedere nu ar fi interzisă transformarea sa într-un pozitron (sarcinile lor electrice sînt egale) și fotoni, pentru compensarea diferenței de masă. Sau, nu pare să fie interzisă anihilarea unui proton cu un electron (avînd aceleași sarcini electrice, dar de semne contrare). Dar deoarece astfel de evenimente nu au fost observate, se ajunge ușor la concluzia că, probabil, există un alt principiu de conservare, care interzice astfel de transformări.

Astfel, a apărut ideea că, în afara sarcinii electrice, ar mai exista un alt tip de sarcină, total diferită, căreia i s-a dat numele de *sarcină barionică*. Ea ar caracteriza toate particulele subnucleare „grele" (barionii), considerîndu-se că doar pentru acestea valoarea sarcinii barionice ar fi diferită de zero. În plus, s-a propus că în cazul barionilor ar fi valabil principiul conservării sarcinii barionice.

Ca de obicei, căutînd analogii relativ simple, fizicienii au acceptat ca o explicație faptul că electronul prezintă stabilitate deoarece este cea mai mică particulă subatomică a cărei sarcină electrică este diferită de zero, la fel cum protonul este stabil deoarece este cel mai „ușor" barion, a cărui sarcină barionică este diferită de zero.

Acceptarea celor de mai sus se bazează pe lucrările lui H. Weyl, care, în 1929, a formulat o lege a conservării sarcinii barionice. Cu un an mai tîrziu, E.C.G. Stückelberg a postulat o lege a sarcinii „grele", analoagă celei de conservare a sarcinii electrice, iar în anul 1949, E.P. Wigner a formulat o lege a stabilității barionice.

Foarte interesant este felul în care Wigner și-a formulat legea. El a menționat că din observațiile făcute pînă în prezent s-a constatat că electronii nu se dezintegrau în neutrini și fotoni și că, prin analogie, protonii nu se dezintegrează în pozitroni și fotoni. După Wigner, aceasta înseamnă că trebuie să fie o lege de conservare pentru protoni. El n-a putut să justifice cu nimic această lege; doar a postulat-o...

În urma acestor „precizări", fizicienii au așezat protonul și neutronul într-o nouă clasă de particule, numite barioni, și, le-a asociat un „număr barionic" egal cu +1. Apoi au presupus că numărul barionic este o cantitate care în natură se conservă. (Antiparticulele corespunzătoare — antiprotonul și antineutronul — au numărul barionic egal cu −1.)

De ce nu se poate dezintegra protonul? — era întrebarea la care trebuia să răspundă noua lege. Explicația apărea acum simplă: dacă protonul s-ar dezintegra într-un pozitron, emițînd fotoni,ar viola legea conservării sarcinii barionice: protonul (care intră în „reacție") are numărul barionic diferit de zero (+1), iar pozitronul și fotonul (particulele care ies din reacție) au fiecare sarcina barionică zero! De asemenea, un proton nu se poate anihila întîlnindu-se cu un electron, emițînd, ca rezultat al reacției doar fotoni, deoarece în acest

proces sarcina barionică nu se conservă: este diferită de zero înaintea anihilării, și egală cu zero după anihilare.

Legea conservării barionice poate explica și procesul invers, de așa-numită „materializare" a particulelor elementare din fotoni. Astfel, un foton de mare energie (din radiația cosmică sau din acceleratorul de particule) poate să se materializeze, generînd perechi: un proton și un antiproton, sau într-o pereche neutron-antineutron. Și în acest caz suma numerelor barionice la ieșire (+1 pentru proton și neutron și —1 pentru antiproton și antineutron) este zero, egală cu numărul barionic al fotonului care a generat perechea.

Neutronul, deși considerat una din cărămizile de bază ale naturii, prezintă, la rîndul său, unele particularități. În stare liberă neutronii sînt instabili (au o viață medie de circa 12 minute), dar cînd sînt legați de protoni într-un nucleu, sînt, în general, stabili. Doar în unele nuclee atomice, ale elementelor radioactive, un neutron se transformă spontan într-un proton, emițînd un electron (dezintegrare beta!) și un antineutrin (și nu *neutrin*, cum a fost numit de Pauli; pe atunci nu se cunoștea o bună parte a „junglei particulelor"!).

Cunoscîndu-se reacția, s-a dedus ușor că neutronul trebuie să aibă numărul barionic +1 (egal cu al protonului), deoarece electronul și antineutrinul au sarcina barionică zero.

Stabilitatea protonului — în discuție

Introducerea numărului barionic nu chiar explică ce anume oprește descompunerea protonului, dar, totuși, îi dă un nume. Legea propusă, a conservării sarcinii barionice, nu este o lege generală a naturii; ea nu are aplicații în afara domeniului particulelor elementare și nu este bazată pe un concept fundamental. Mai mult chiar, ea ar fi o „lege suspectă" chiar dacă nu ar fi arbitrară. De ce?

Pînă acum cîțiva ani, fizicienii credeau că toate particulele subnucleare, în speță barionii, mai masive decît protonul și electronul, în final se vor descompune în una din aceste particule considerate ca doi constituenți de bază ai materiei. Cele două particule au fost considerate imuabile și deci nu puteau face obiectul unei dezintegrări. Oricum însă, anumite considerații teoretice, avînd ca pionier pe A. Zaharov (1967)

au condus la concluzia că existența relativ rară a protonului în marea vastă de lumină (de fotoni) a Universului (doar $1/10^9$) implică faptul că protonul este instabil!

Dar, *din datele existente pînă în prezent*, se pare că Universul este compus în întregime din protoni și electroni. Pentru fiecare purtător de sarcină pozitivă (proton) există, evident, un purtător de sarcină negativă (electron), astfel încît, în întregul său, Universul este neutru din punct de vedere electric. Aceste considerații sînt consistente cu legea conservării sarcinii electrice.

Dar, de asemenea din datele cunoscute pînă în prezent, se pare că Universul nu este neutru din punctul de vedere al sarcinii barionice — fapt care pune pe „lista suspecților" legea conservării barionice! De departe, în Universul cunoscut există mai mulți protoni (numărul barionic +1) decît antiprotoni (numărul barionic —1). Potrivit unor teorii (care vor fi prezentate în secțiunile următoare), se pare că în viața Universului a existat o perioadă cînd au avut loc reacții în care a fost violată legea conservării barionice...

Deși problema stabilității protonului a fost cunoscută din anii '30—'40, i s-a dat importanță abia după anul 1974, cînd au apărut noi modele teoretice ale lumii microcosmosului. Problema este destul de delicată și caută să răspundă la întrebarea: cît de stabilă este substanța în Univers? Oare, în Univers, singura particulă stabilă este electronul și toate celelalte nu sînt decît forme intermediare?

Aceste întrebări au deschis un vast cîmp de cercetare pentru fizicieni și se așteaptă răspunsuri atît din partea teoreticienilor, cît și din partea experimentatorilor.

După cum se va arăta în secțiunile următoare, experimentatorii s-au pus la lucru; au fost organizate experiențe „monumentale", foarte sensibile, pentru detectarea eventualelor dezintegrări ale protonului.

Antimateria

La începutul secolului al XX-lea, fizicienii au făcut o descoperire extrem de incomodă filozofilor și cosmologilor, care erau convinși că natura este guvernată de o simetrie universală. Descoperirea era rezultatul unor numeroase experimente, cu instrumente și tehnici de lucru extrem de deli-

cate, cerute de noua lume a microcosmosului, ce se deschidea ca o mare necunoscută.

Faptele se refereau la cele două particule subatomice de bază: electronul și protonul. Anume, în timp ce unitatea de sarcină electrică negativă era purtată de electron, unitatea de sarcină pozitivă era purtată de proton, o particulă avînd masa de circa 1 840 de ori mai mare decît cea a electronului.

Filozofii s-au întrebat: de ce sarcinile electrice negative și cele pozitive sînt asociate cu particule avînd masele atît de diferite? Sau, oare, trebuie să ne așteptăm ca sarcini opuse și egale să fie asociate unor particule opuse și egale? — aceasta ca totuși să fie satisfăcută presupusa simetrie universală.

Cu alte cuvinte, ar putea exista o antimaterie, în care atomii — sau mai corect spus, antiatomii — sînt constituiți din antiprotoni, antineutroni și antielectroni (pozitroni)?

Susținătorii simetriei universale au fost oarecum satisfăcuți cînd P.A.M. Dirac a prezis, pe baze matematice, că la orice reacție în care intervin particule subatomice, corespunde o reacție în care sînt implicate respectivele lor antiparticule și că în aceste două reacții lucrurile se petrec exact analog. Cu alte cuvinte, în fizică și-a făcut loc un nou principiu de simetrie: simetria dintre materie și antimaterie.

Discuțiile au început să fie mai consistente după ce, în anul 1932, Anderson a descoperit pozitronul în cercetările sale asupra radiațiilor cosmice. După descoperirea acestui „electron pozitiv" sau „antielectron", a urmat pasionanta vînătoare a antiprotonului. Chiar dacă în înregistrările unor experimente cu radiațiile cosmice au fost identificate urmele unor antiprotoni, cercetătorii și-au îndreptat atenția spre uriașele acceleratoare, care își consolidau poziția în laboratoare. Într-o serie de experiențe ei au reușit să pună clar în evidență antiprotonii, în anul 1955, folosind metode de înregistrare deosebit de eficiente, ca, de pildă, contorul Cerenkov pentru determinarea vitezei particulei.

A urmat o lungă perioadă de căutare experimentală a antiparticulelor, creîndu-se coliziuni de particule subnucleare în acceleratoare de energii mari. Un rezultat interesant al coliziunilor — de altfel era și de așteptat — a fost acela că particulele și antiparticulele apar simultan, ca frați gemeni. Astfel că simetria materiei cu antimateria a primit încă o confirmare experimentală, fiind admisă acum ca unul dintre principiile fundamentale ale fizicii.

De la antiparticule au urmat, firesc, considerațiile (teoretice) asupra antiatomilor. Combinația dintre un antiproton și un antielectron va forma un antiatom de antihidrogen, căruia legile cunoscute ale fizicii atomice îi vor prezice aproape aceleași proprietăți ca și ale atomului de hidrogen obișnuit. De pildă, antiatomul de antihidrogen va emite un spectru luminos identic cu cel al atomului de hidrogen, fiind astfel imposibil de identificat prin acest fel de analiză.

Antiatomii de antihidrogen, în schimb, se vor combina între ei, formînd molecule de antihidrogen și pot constitui un gaz cu proprietățile tipice ale hidrogenului obișnuit, printre altele lichefiindu-se la —252°C.

Mergînd mai departe pe linia considerațiilor teoretice și ipotetice, similar, antipaticulele ar putea compune toate elementele grele, mai corect spus toate antielementele grele. Antielementele, pînă la antiuraniu, ar putea constitui o antimaterie, din care o antilume, incluzînd, în principiu, o antiviață...

Și totuși, în afara rezultatelor obținute în laboratoare, prin provocare energetică, antimateria nu a fost niciodată întîlnită liberă în natură. Atomii care alcătuiesc toate substanțele de pe Terra sînt compuși din protoni, neutroni și electroni, dar niciodată din antiparticule ale acestora.

Au început inevitabilele întrebări: oare, așa stau lucrurile în întregul Univers, există o asimetrie între materie și antimaterie în favoarea materiei? Dacă este așa, atunci, oare, asimetria a existat dintotdeauna sau Universul a început cu un număr egal de particule și antiparticule, iar ulterior a intervenit ceva care a modificat balanța?

Descoperirea antimateriei a deconcertat profund pe fizicieni, astronomi, cosmologi și filozofi. Cunoscînd verificata lege a simetriei universale, de dragul simetriei trebuie să fie totuși imaginat un Univers compus, în părți egale, din materie și antimaterie. Ideea este generoasă, dar ridică o serie de probleme dificile. Nici un sistem nu poate exista în proporția jumătate materie și jumătate antimaterie, deoarece cele două forme se anihilează reciproc. La anihilarea unui atom cu un antiatom, coliziunea dintre un proton și un antiproton, de pildă, duce la formarea unui mezon și a unui antimezon, care, la rîndul lor, se dezintegrează rapid și emit electroni, pozitroni, neutrini și fotoni. Aceasta la nivelul nucleelor. Dar după ciocnire ar mai rămîne electronii

și antielectronii orbitali, care nici ei nu pot coexista. Ciocnirea lor are ca rezultat anihilarea reciprocă și este, de asemenea, însoțită de emiterea de fotoni.

Deci trebuie exclusă total coexistența materie-antimaterie, una în apropierea celeilalte. Unicul mod de a avea o dovadă a unei eventuale existențe a antimateriei este de a o căuta undeva în depărtările Universului. Prezența ei ar putea fi semnalată prin procesul de anihilare cu materia, cu eliberarea unei energii uriașe, care ar fi de circa 2 MeV pe o anihilare proton-antiproton. Iată deci o cale, să se caute undeva, pe cer, surse de energie de această valoare. Dar astfel de evenimente nu pot avea loc la nivelul Galaxiei noastre (decît într-o măsură extrem de mică), ci, eventual, în afara ei. Dacă, de pildă, ar exista galaxii compuse din antimaterie și una dintre acestea ar întîlni o galaxie compusă din materie, atunci anihilarea lor ar elibera o energie enormă, care ar putea fi observată de pe Terra.

Pînă în prezent au fost observate două astfel de cazuri, de ciocniri între galaxii, care sînt extrem de interesante. Este vorba de galaxiile Messier 87 și Lebăda A, de la care ajung pînă pe Terra semnale radio extrem de puternice. Despre prima se presupune că are loc un proces de capturare a unei „bucăți de antimaterie", iar fotografiile cu galaxia Lebăda A arată că, de fapt, este vorba de două galaxii în coliziune. Cercetările sînt în curs pentru a stabili dacă în procesele respective intervine sau nu antimaterie...

Mai există și alte păreri. Astfel, susținătorii simetriei universale spun că, oricare ar fi originea Universului, dacă în el există antimaterie, atunci aceasta a apărut simultan cu materia și în cantități egale. Întrucît se pleacă de la ipoteza că *în prezent* ar exista antimaterie, ar fi fost necesar ca cele două forme să se separe imediat; altfel s-ar fi anihilat reciproc. Formele respective astfel separate s-ar fi condensat în formă de stele și galaxii.

Procesul de separare este însă enigmatic; el ar putea avea loc doar dacă între atomi și antiatomi s-ar exercita forțe gravitaționale de respingere, adică o gravitație de sens opus de cum se manifestă ea în cazul materiei. Cu alte cuvinte o antigravitație (ca o simetrie a gravitației!).

Dacă se ține însă cont că prin acceptarea ideii de antigravitație se violează principiile de bază ale teoriei generale a relativității se poate ușor imagina că ipoteza a fost respinsă

de majoritatea fizicienilor. Adepții antigravitației ar avea, deocamdată, o singură cale pentru a-și susține ipoteza: experimentul. Teoretic un astfel de experiment ar consta în proiectarea în Cosmos, în apropierea Pămîntului (radial cu un diametru), a unui fascicul de antiprotoni. Dacă se va constata că fasciculul se îndepărtează de Terra, fenomenul ar constitui o dovadă a existenței antigravitației.

Principial experimentul este posibil, dar realizarea lui practică va trebui încredințată fizicienilor viitorului...

În realitate, unele considerații ale fizicianului Shiff par să ducă la concluzia că antigravitație nu există, că între proton și antiproton forțele gravitaționale sînt de atracție, întocmai ca între proton și proton.

Uneori fizicienii să lasă seduși de idei care par de domeniul pur al fanteziei. De pildă, M. Goldhaber consideră că ar putea exista două lumi separate, una formată din materie, iar cealaltă din antimaterie. El mai precizează că la originea Universului ar fi fost o singură entitate, pe care a numit-o „universon". Universon-ul s-ar fi divizat în două părți: „cosmon" și „anticosmon", care s-ar fi îndepărtat imediat după formare, generînd astfel Cosmosul nostru (din „cosmon") și un Anticosmos (din „anticosmon"), care este cu totul în afara posibilităților noastre de observație. Dacă, în unele zone, într-un oarecare mod, o foarte mică parte din antimateria presupusă a constitui Anticosmosul, străbate în Cosmos, aceasta ar putea produce (sau explica?) fenomenele care au loc în prezent în galaxiile Messier 87 și Lebăda A.

Aceasta însă, deocamdată este considerată pură fantezie. Dar, oare, cu 24 de secole în urmă, ideile lui Democrit asupra atomilor nu erau doar o simplă fantezie?...

Chiar dacă se admite că ar exista două sisteme (Univers și Antiunivers), cum s-ar putea preveni cu cele două forme să nu se întîlnească, să nu se anihileze reciproc? Încă nu există o părere unanimă. Fizicianul O. Klein susține că materia și antimateria pot fi ținute separat printr-un strat foarte fierbinte, care s-ar forma între zonele de separare dintre ele. Stratul fierbinte ar fi produs de reacțiile de anihilare între particulele și antiparticulele care se întîlnesc la zona de separare.

Ipoteza lui O. Klein ne pune în fața posibilitatea ca antilumile să fie într-adevăr vecinii noștri, astronomic vorbind. Deci nu ar putea fi exclusă posibilitatea ca Nebuloasa

Andromeda, cea mai apropiată galaxie, sau chiar unele stele din Galaxia noastră să fie compuse din antimaterie. Privind stelele de pe cer, cum am putea spune care sînt din materie și care din antimaterie? Un corp compus din antimaterie va emite exact același spectru ca un corp compus din materie Deci, prin observații spectroscopice este imposibil de dat un răspuns.

Este însă adevărat, că într-un *cîmp magnetic dat*, materia și antimateria ar prezenta efecte Zeeman diferite. Efectul

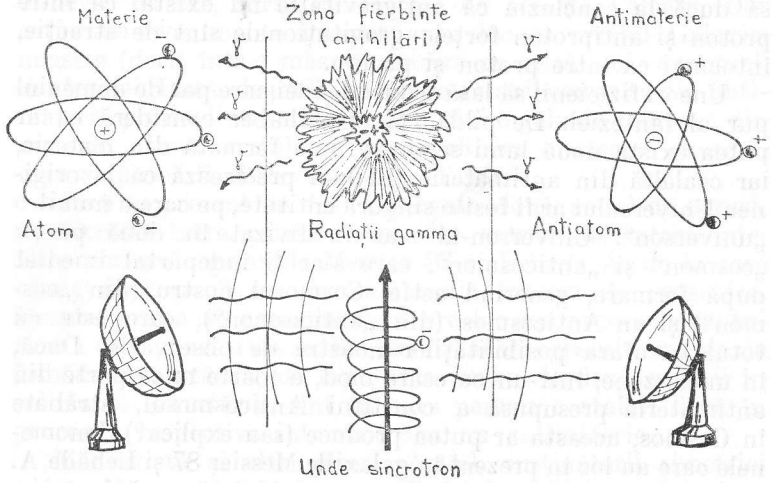


Fig. 27. O ipotetică zonă de întîlnire a materiei cu antimateria.

Zeeman constă în despicarea liniilor spectrale rezultînd din acțiunea unui cîmp magnetic asupra electronilor din atomi sau molecule. Cînd un cîmp magnetic, de un anume sens, acționează asupra unui pozitron, despicarea liniilor spectrale are loc în sens opus decît în cazul unui electron aflat în același cîmp magnetic și în acest fel antimateria ar putea fi deosebită de materie. Dar întrucît cîmpurile magnetice asociate materiei și respectiv antimateriei au sensuri opuse, efectul Zeeman va fi exact același, în ambele situații.

O altă ipoteză asupra materiei și antimateriei în univers, susținută de I. Pati și A. Salam pornește de la ideea că, la început, după „Marea explozie" (Big Bang) amestecul de

materie și antimaterie ar fi fost de un miliard de ori mai mare decît materia care a supraviețuit; restul ar fi dispărut prin anihilare reciprocă. Cum această ipoteză presupune că toată antimateria ar fi fost anihilată, în favoarea materiei, a fost dată o explicație și anume că la foarte scurt timp, în urma „Marii explozii", ar fi existat „ruperi de simetrie" în formarea particulelor și antiparticulelor, care, simplu vorbind, ar fi dus la o superioritate a materiei. Deci, întocmai ca într-un calcul de scădere aritmetic, în urma anihilărilor la nivelul Universului, a cîștigat materia. Poate de aceea Universul este atît de „rar" în aglomerări de substanță.

Susținătorii acestei ipoteze găsesc fără sens căutarea în Univers a antimateriei. Pentru ei departajarea a fost definitivă, în sensul că în Univers există numai materie. Tot în cadrul acestei ipoteze, dacă se acceptă teoria Universului pulsatoriu, în care materia Universului va fi adusă din nou la o formă simplă, după încetarea expansiunii, înainte de o nouă „Mare explozie", nu se poate prevedea în favoarea cui se va produce o nouă „rupere de simetrie": a materiei sau a antimateriei.

Pe de altă parte, susținătorii ipotezei coexistenței materiei și antimateriei în Universul nostru sînt preocupați de găsirea unei metode de identificare. O posibilitate care se conturează ar fi aceea că s-ar putea detecta prezența antimateriei în spațiu descoperind unele emisiuni specifice de energie (radiații gama) ale „zonei fierbinți" dintre o lume și o antilume, bineînțeles dacă energia emisă va fi suficient de mare pentru tehnica de recepție a prezentului.

O altă posibilitate ar fi recepționarea undelor radio (radiații sincrotron produse de electronii accelerați la viteze apropiate de viteza luminii), pe care se presupune că le-ar emite „zona fierbinte" a anihilărilor reciproce dintre materie și antimaterie. Detectarea lor ar fi posibilă prin radiotelescoape foarte puternice. În orice caz, detectarea radiațiilor sincroton este de circa 10 milioane de ori mai ușor de realizat decît cea a emisiunii gama a aceleiași zone.

Nu ne mai rămîne decît să așteptăm vești noi...

Încercări de sistematizare

Din toate cele prezentate pînă acum se poate ușor desprinde impresia pe care o poate lăsa imaginea conturată

pentru lumea microcosmosului: confuzie. Pînă nu demult, la începutul anilor'60 fizicienii erau copleşiţi de această situaţie. Părea că în orice direcţie se întorceau, cineva descoperea o nouă particulă. Departe de a lămuri problema interacţiilor tari, puternicele acceleratoare, înzestrate cu un echipament de detectare ultrasofisticat, stîrneau din ce în ce mai multă confuzie. Pe măsură ce energiile obţinute în instalaţiile de accelerare au atins 20—30 GeV, descoperirea de noi particule (în special din domeniul rezonanţelor) erau evenimente la ordinea zilei. De fapt, în deceniul'60, „vînătoarea în jungla coliziunilor" a devenit un fel de industrie casnică a fizicienilor.

Un exemplu edificator al acestei stări de lucruri îl constituie prima listă de particule elementare, întocmită de fizicianul Matt Ross, în 1963. Articolul publicat în „Review of Modern Physics" avea cinci pagini şi în două tabele cuprindea 17 „particule" şi 24 „rezonanţe". Articolul a apărut periodic, fiind „revăzut şi adăugit" la fiecare republicare În anul 1972 s-a renunţat la distincţia dintre particule şi rezonanţe. Ultima publicare a articolului, în 1976, se întindea pe ...245 pagini (cu un supliment de 30 pagini!), ocupînd întregul număr al revistei. În tabele erau cuprinse şi catalogate sute de particule descoperite şi identificate.

Desigur, o dată ce particulele au început să apară într-o astfel de avalanşă, se punea cu multă acuitate căutarea unei ordini.

Ordine, dar cum? Atunci cînd oamenii au început să descifreze lumea microcosmosului erau însufleţiţi de speranţa că vor ajunge să cunoască simplitatea naturii. Pentru o perioadă se părea că s-au apropiat de un astfel de tablou, dar noianul de descoperiri ulterioare părea să spună cu totul altceva. Adică, dacă există mai multe particule elementare decît elemente chimice, atunci tabloul lumii nu a devenit nicidecum mai simplu decît era înainte. În plus, particulele care au fost descoperite în aşa mare număr nu puteau fi chiar „elementare" în adevăratul sens al cuvîntului.

Exista o mare tentaţie să se excludă unele particule din categoria particulelor elementare, în special pe cele cu viaţă foarte scurtă. Dar după ce criteriu? Unii au sugerat *stabilitatea*. Dar dacă se exclud toate particulele instabile, ar trebui să fie scoşi neutronii şi pionii, care sînt necesari pentru explicarea structurii nucleului.

Nici *timpul de viaţă* nu s-a dovedit un criteriu viabil. Dacă s-ar păstra în clasificare doar particulele cu viaţă relativ lungă, atunci mai rămîne enigma stranietăţii. În plus, se ştia că rezonanţele *ro* şi *delta* joacă un rol mult mai important în confinarea nucleului decît, de pildă, particula „cascadă" (xi), care are o viaţă mai lungă. Mai mult chiar, în lumea particulelor elementare, noţiunea legată de *timp lung* sau *timp scurt* nu constituie un criteriu de măsură, standardul de timp constituindu-l timpul caracteristic interacţiilor tari. Din acest punct de vedere, toate particulele au *viaţă lungă*, întrucît toate „trăiesc" suficient pentru a li se permite să participe la o interacţie tare.

Deci, nu a existat nici o cale consistentă de a declara că unele particule sînt „mai elementare decît altele". Această situaţie a fost declarată de fizicianul G.F. Chew ca fiind „democraţia nucleară"... De aceea, fizicienii au trebuit să accepte faptul că există „o mulţime de particule nucleare" şi să aştepte să vadă unde se va ajunge.

Desigur, pe primul loc al listei priorităţilor se afla, în continuare, „stabilirea unei ordini" în haosul creat. Pentru a ţine sub control proliferarea de particule „elementare" au fost folosite atît clasificarea, cît şi reducerea.

O clasificare a fost din punct de vedere al interacţiilor, care, după cum s-a arătat anterior, sînt: tari, electromagnetice şi slabe. Electronul, miuonul şi neutrinul nu iau parte la interacţiile tari; de aceea, aceste particule au fost numite *leptoni* (însemnînd *uşori*, dar şi *care interacţionează slab*).

Leptonii constituie un grup mic şi este important în special în studiul dezintegrărilor lente şi alte interacţii slabe.

Toate celelalte particule întîlnite anterior, cu excepţia fotonilor, sînt implicate, într-o formă sau alta, în interacţiile tari. Ele au fost numite *hadroni*. Proliferarea particulelor despre care s-a vorbit este în special în acest domeniu. De aceea, cea mai mare parte a eforturilor fizicienilor de a cataloga particulele elementare privea hadronii.

Din punct de vedere al schemei de clasificare legată de interacţii, fotonul este, în general, singur într-o clasă, deoarece el este particula care mediază interacţiile electromagnetice.

Un alt criteriu de clasificare este după produsele de dezintegrare. Dacă se urmăreşte un hadron, un timp suficient de lung, se va constata că el se dezintegrează în cîteva particule stabile — proton, electron, foton şi neutrin. Unele dintre

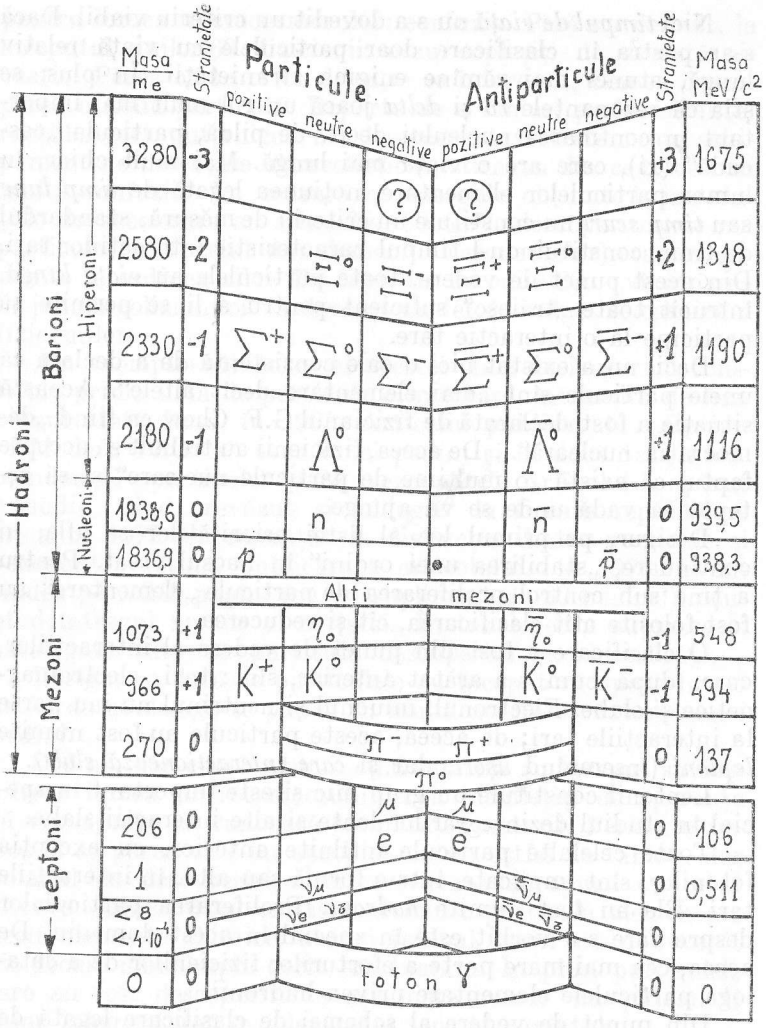


Fig. 28. Cartea junglei particulelor elementare.

aceste dezintegrări sînt rapide, altele lente, dar în final toate dau produse stabile. *Prezența sau absența protonului* în produsele finale ale dezintegrării hadronilor a dus la un criteriu de clasificare. Astfel, dacă în produsele finale ale dezintegrării

hadronilor apare protonul, particulele respective sînt numite *barioni* (grele) — cum sînt protonul însuși, lambda, sigma, delta ș.a. Iar acele particule care prin dezintegrare dau ca produse finale doar leptoni și fotoni sînt numite *mezoni* — cum sînt pionii, kaonii etc.

Conceptului de clasificare în barioni și mezoni i se mai asociază încă un aspect cantitativ, care definește mărimea cunoscută sub numele de *număr barionic (B)*. Acesta reprezintă numărul protonilor care apar în starea finală a dezintegrării. Pentru toți barionii discutați mai sus, $B = 1$, în timp ce pentru mezoni $B = 0$, iar pentru antibarioni, $B = -1$.

Și viteza de dezintegrare reprezintă un criteriu de clasificare a particulelor elementare. După cum s-a arătat anterior, timpul de viață a particulelor poate fi asociat unei calități a acestora, numită *stranietate*. Stranietatea poate fi contabilizată întocmai ca sarcina electrică și este notată, de obicei cu litera *S*. Stranietatea se exprimă numai în numere întregi (pozitive sau negative).

Termenul de „stranietate" a fost introdus de fizicianul M. Gell-Mann — care avea să-și mai demonstreze simțul umorului în calitate de „naș" — și a „prins" repede în lumea fizicienilor, poate dornici de a da o tentă mai veselă subiectelor lor din ce în ce mai serioase și abstracte. Poate considerau că introducerea de puțin umor în limbajul folosit curent va face bine profesiei de fizician. Chiar dacă fizicienii știu precis despre ce este vorba cînd vorbesc de stranietate și pot să-i asocieze cantități măsurabile, ca lungimea urmelor în camera cu bule, le este aproape imposibil să se descurce cu sensul precis al noțiunii literare a cuvîntului...

Mai există și alte criterii de clasificare, din care unele au fost prezentate anterior: *spinul* și *paritatea*, iar altele, mai speciale, nu prezintă importanță pentru scopul propus al lucrării de față. Totuși, în legătură cu clasificarea după spin, ar merita reținută următoarea sistematizare (a particulelor discutate pînă acum):

Spinul	*Particula*
0	mezoni
1/2	electron, proton, neutron, miuon neutrin, lambda, sigma, xi
1	foton
3/2	delta

Rezumînd, pentru a face o clasificare în „jungla" particulelor „elementare", în primul rînd trebuie să se stabilească dacă este vorba despre un hadron sau un lepton. Dacă este un lepton, nu prea sînt multe de făcut în plus. Dacă însă este un hadron, atunci trebuie precizat: barion sau mezon, straniu sau nestraniu, ce sarcină electrică are, ce spin are etc. Toate aceste proprietăți, împreună cu masa particulei, dau suficiente date care să permită așezarea într-un tablou de clasificare.

Figura 28, un fel de „carte a junglei", încearcă să redea sugestiv o sistematizare a particulelor discutate pînă acum.

Capitolul 10

MODELUL QUARKURILOR

O sistematizare elegantă

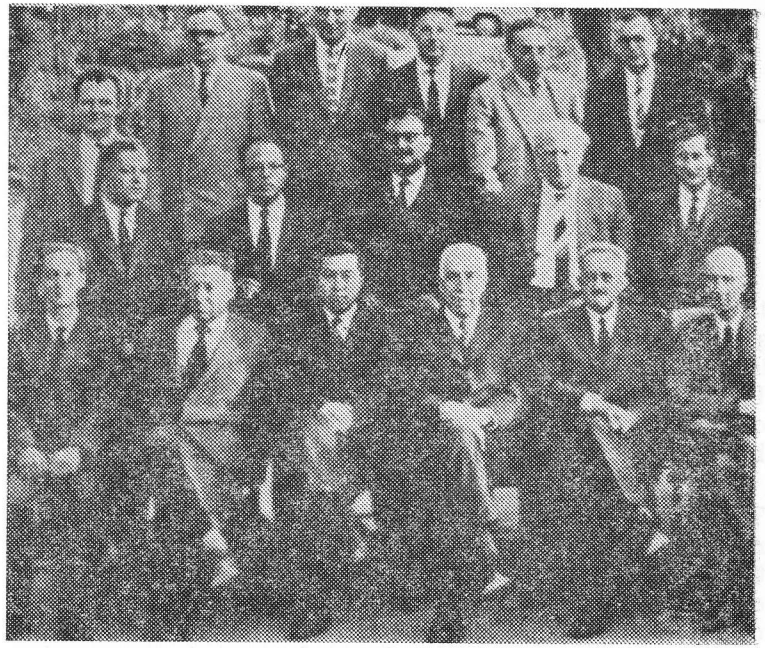
Paralel cu sofisticarea aparaturii de cercetare a lumii particulelor subnucleare s-au înmulțit ideile teoretice, devenite și ele din ce în ce mai ingenioase, astfel încît explicațiile au început să justifice și chiar să prevadă evenimente noi. Unul dintre principalele scopuri al noilor teorii era de a face ordine între particulele subnucleare identificate, de a le stabili legile de comportare și de a le sistematiza.

La început acest lucru s-a părut imposibil de realizat. Transformările erau caracterizate prin procese extrem de rapide și, ceea ce era mai derutant, o particulă putea fi socotită componenta unei alte particule, cît și ca o particulă compusă... Exemplul cel mai cunoscut era transformarea unui pion într-un proton și un antineutrin — adică protonul este o componentă a pionului. Pe de altă parte însă, un proton poate apărea ca rezultatul interacției dintre un pion și un neutron — deci pionul este o componentă a protonului...

Dar aveau să mai apară și alte descoperiri care complicau și mai mult drumul spre sistematizare. După identificarea primelor rezonanțe, adică a acelor agregate de scurtă durată între mezoni și nucleoni (hadroni), fizicienii au „simțit" că evenimentele de acest tip erau ceva cu totul special. Intuiția lor s-a reflectat în numele pe care l-au dat numeroșilor nou-veniți.

La început rezonanțele au fost înregistrate individual, dar aglomerarea lor i-a cam încurcat pe clasificatori, care nu mai dispuneau de un sistem literal potrivit. Dar prin observarea dezintegrării rezonanțelor s-a ajuns la concluzia că lucrul de sistematizare se simplifică mult dacă pe baza proprietăților lor, noile particule sînt considerate sub formă de familii.

O clasificare a familiilor rezonanțelor se face în funcție de particulele de bază care stau la formarea lor: barioni sau



Fizicieni din două generaţii, participanţi la Consiliul Solvay din 1961. De la stînga, rîndul de jos: S. Tomonaga, W. Heitler, Y. Nambu, N. Bohr, F. Perrin, J.R. Oppenheimer. Rîndul 2: I. Prigogine, A. Pais, A. Salam, W. Heisenberg, F.J. Dyson. Rîndul 3: A.S. Whightman, S. Mandelstam, G. Chew, M.L. Goldberger, G.C. Wick, M. Gell-Mann.

mezoni. Una din listele de sistematizare cuprinde familia barionilor, notată prin Δ (delta), λ (lambda), Σ (sigma) şi Ξ (xi). La fel există şi o clasificare a familiilor mezonice, care au fost notate: η (eta), ρ (ro), φ (fi) etc.

S-a observat că privind sub acest unghi numeroasele particule inventariate se poate aplica o schemă care aduce o simplificare radicală a problemei proliferărilor hadronilor. Dacă fiecare rezonanţă este privită ca un nou membru al unei familii, neavînd o semnificaţie mai deosebită decît cea a unui electron pe o „orbită" a unui atom, atunci a fost realizată într-o mare măsură o ordine în aparentul haos al particulelor. Prin acceptarea sistematizării propuse, numărul

familiilor rămîne relativ mic, oricît de mult ar creşte numărul particulelor descoperite.

Prima schemă în care s-au arătat într-adevăr legăturile fundamentale dintre particulele din diferite familii a fost elaborată în 1961, de M. Gell-Mann (S.U.A.) şi, independent, de Yuval Ne'eman (Marea Britanie). Schema stabileşte legături logice între particulele elementare întocmai cum sistemul periodic al elementelor explică legăturile dintre diversele elemente chimice, avînd chiar şi rolul de prezicere a unor noi componenţi. Schemele au un interesant element comun: ambele au fost organizate empiric, fără explicaţii...

Succesul sistematizării particulelor se datoreşte uneia dintre proprietăţile descoperite relativ recent — stranietatea (S), cea care le afectează timpul de viaţă. Se ştie că stranietatea se contabilizează ca sarcina electrică, are numai valori numere întregi şi poate fi pozitivă sau negativă. Astfel, există particule normale ($S = 0$), cu stranietate simplă ($S = \pm 1$) şi cu dublă stranietate ($S = \pm 2$).

Deşi ar fi părut tentant ca organizarea particulelor să se facă pe trei grupe (normale, cu stranietate simplă şi cu dublă stranietate), totuşi, pentru simplificare ele au fost împărţite mai întîi în două mari categorii, avînd mase apropiate.

O primă surpriză! Căutînd să se obţină forma de aranjare, s-a constatat că cele două familii prezintă simetrii diferite. Nici pînă în prezent nu poate fi explicată preferinţa naturii pentru astfel de forme.

Sistematizarea celor două familii poate fi socotită ca un nou exemplu de fantezie creatoare care de atîtea ori a adus

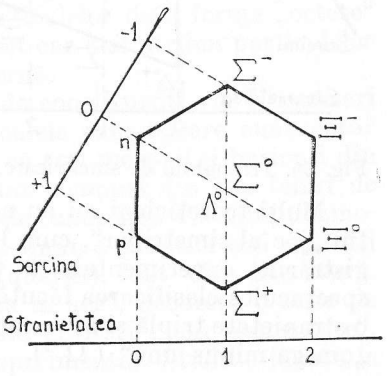


Fig. 29. Hexagonul de simetrizare.

mari servicii științei. Astfel, prima dintre cele două familii, care reprezintă protonul și rudele sale apropiate (hiperonii), a fost organizată sub forma unui hexagon. Aici au fost cuprinși protonul, neutronul și hiperonii sigma, xi și lambda.

Ce-a de-a doua familie a fost organizată triunghiular și cuprinde rudele îndepărtate ale protonului. Aici au fost incluse particule cunoscute (hiperonii sigma și xi, care putînd să aibă mase diferite fac parte din ambele familii), iar pentru celelalte locuri cerute de simetrie au fost făcute completări, respectiv cu rezonanțe delta.

Completarea schemei a fost necesară întrucît clasificarea în formă de triunghi a apărut incompletă (numai cu particule cunoscute de stranietate simplă și dublă). Pentru particulele cu stranietatea zero au fost preconizate rezonanțele *delta*, dar partea cea mai interesantă era oferită de „vîrful" triunghiului, care „cerea" o particulă cu stranietate triplă! Or, pînă atunci nu era cunoscută nici o astfel de particulă dar ordinea cu care se înscriau celelalte particule în sistematizare sugerau existența ei.

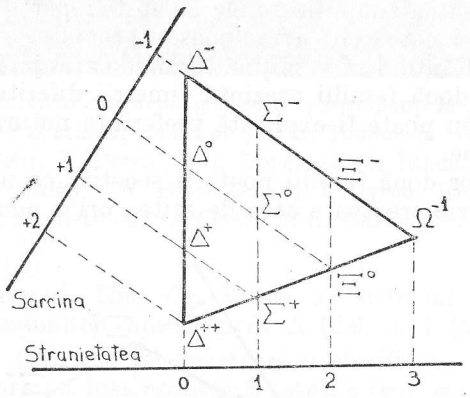


Fig. 30. Triunghiul de simetrizare.

Mulți teoreticieni nu au acordat prea multă atenție acestui „joc al simetriilor", cum l-au numit, dar apariția în înregistrările experimentale a particulei prezise a omologat spectaculos clasificarea făcută. Noua particulă, care prezenta o stranietate triplă și avea sarcina electrică —1 a fost numită „omega-minus unu" (Ω^{-1}).

Quarkurile

Cum era de altfel de așteptat, din acumularea datelor experimentale și din confruntarea teoriilor a apărut și ideea genială care, pe drept cuvînt se poate spune că a dus la un nou salt al fizicii secolului nostru. Clasificarea inspirată făcută independent de M. Gell-Mann (comunicată în scris la 20.I.1961) și Yuval Ne'eman (comunicată în scris la 13.II.1961) s-a dovedit extrem de fecundă. Y. Ne'eman, care este și un foarte bun matematician, și-a dat curînd seama că există o relație între grupurile de particule cunoscute experimental și o teorie matematică, numită teoria grupurilor. În particular, hadronii sînt asociați cu un grup special, numit *SU (3)*. Fără a intra în detalii, se poate spune că cu ajutorul acestei scheme matematice este posibilă o clasificare a familiilor de particule într-o manieră care amintește de sistematizarea făcută de Mendeleev. Regularitățile observate sînt atît de clare încît au permis prezicerea existenței unor particule încă necunoscute, așa cum sau petrecut lucrurile cu particula „omega-minus unu".

După cum se vede în figura cu simetria hexagonală, la mijloc sînt două particule, care, parcă, strică simetria. Or, tocmai teoria grupurilor cere ca în mijlocul hexagonului să fie două particule!

În anul 1963, M. Gell-Mann a sugerat o ipoteză simplă pentru explicarea cu succes a simetriei „octetului" hexagonal: după cum sistemul periodic al elementelor, acceptat ca atare, a putut fi explicat considerînd că atomii elementelor posedă o structură internă, cu un nucleu în jurul căruia orbitează electronii, tot așa tendința particulelor de a forma „octete" poate fi înțeleasă dacă și în acest caz s-ar atribui particulelor componente o structură internă.

Întrebarea însă era: ce fel de constituenți vor fi necesari pentru a putea produce particulele subnucleare cunoscute? M. Gell-Mann a sugerat teoria că toți mezonii și barionii din natură (adică toți hadronii) sînt compuși din trei feluri de entități, mai elementare decît cele cunoscute. Cu simțul umorului care îl caracterizează, Gell-Mann a dat celor trei entități numele fantezist de *quarkuri* (quarks), luat din literatură.

De fapt, propunerea „plutea în aer", deoarece o serie de fizicieni au preconizat că există entități „mai elementare". În plus, exista și un suport experimental. Studiile făcute la

Murray Gell-Mann

acceleratorul SLAC (Stanford), la sfîrșitul anului 1960, în care electroni de mare energie au bombardat protoni și neutroni, au sugerat o astfel de ipoteză. Anume, distribuția energiilor și unghiurile de împrăștiere ale electronilor pe protoni și neutroni înregistrate au indicat clar că unii electroni s-au ciocnit cu „obiecte" punctiforme, încărcate electric, care se aflau în interiorul protonilor și neutronilor.

În paralel cu teoria lui Gell-Mann au fost propuse și alte scheme de modele (S. Sakata, G. Zweig, Y. Ne'eman), dar acestea nu erau destul de complete pentru a deveni prioritare.

În legătură cu modelul propus de ei, în anul 1963 Gell-Mann scria: „Ar fi distractiv să se speculeze cum s-ar comporta quarkurile dacă ar fi particule fizice, în loc de a fi entități pur matematice". Însă, în ciuda acestei declarații „de renegare" (sau de precauție?), curînd mulți fizicieni erau să fie convinși că quarkurile au o existență materială, iar în prezent această părere este predominantă.

Ar fi greșit ca cineva să-și imagineze că elaborarea unor modele sau scheme, care explică oarecum empiric proprietăți fizice, ar fi jocul unei întîmplări. De fapt, ele se bazează pe numeroase experiențe, iar interpretarea rezultatelor, corelată cu „intuiția de fizician", conduce la construcții de sistematizare. Astfel, nici propunerea făcută de Gell-Mann,

cu toată fantezia sa de „naș" nu era nicidecum năstrușnică. El a observat că anumite proprietăți ale mezonilor și barionilor, precum și, în particular, principiile lor de simetrie, ar putea fi elegant explicate pe baza quarkurilor propuse de el. Și apoi, mai avea și suportul material al experiențelor menționate, făcute cu acceleratorul SLAC.

Dar ce sînt, de fapt, quarkurile? În primul rînd, pentru a „produce" particulele subnucleare cunoscute, quarkurile trebuie să aibă proprietăți neobișnuite. De pildă, ele trebuie să posede sarcini electrice care să reprezinte fracțiuni din sarcina electronului și protonului. Chiar și numai această singură proprietate face din quarkuri particule unice, deoarece toate celelalte particule cunoscute au sarcina electrică egală cu cea a electronului sau protonului sau un multiplu întreg al lor. Dar faptul cel mai revoluționar era că, acceptînd ipoteza quarkurilor, întregul edificiu al așa-ziselor particule elementare cunoscute pînă acum sub acest nume, începe să se clatine, acestea fiind considerate ca avînd structură internă.

Deci, Gell-Mann a aruncat pe masă „cărțile sale" — trei quarkuri, al căror nume vehiculate azi sînt: up (sus) down (jos) și strange (straniu), uneori numite și „arome" (flavors). Quarkurile au mai avut și alte nume, dar pe parcurs au fost abandonate și chiar din cele menționate mai sus, fizicienii au reținut doar inițialele, ca simboluri. Deci se poate vorbi de quarkurile u, d și s. Iar fiecărui quark îi corespunde cîte un antiquark, adică antiquarkurile (notate cu bară deasupra): $\bar{u}$, $\bar{d}$ și $\bar{s}$.

Quarkurilor le-au fost atribuite sarcini electrice fracționare astfel: quarkul u are sarcina $+2/3$, iar fiecare din quarkurile d și s au sarcina $-1/3$ (din unitatea de sarcină electrică $e = 1$).

Alte detalii: quarkurile au spinul 1/2 și numărul barionic 1/3. Din punct de vedere al stranietății, u și d au $S = 0$, iar quarkul s are stranietatea $S = -1$. Deci quarkul s intră în componența tuturor particulelor cu stranietatea diferită de zero.

Ne putem ușor imagina cu cîtă delectare au căutat fizicienii să găsească combinațiile de quarkuri cu care să fie explicate structurile barionilor. Printre primele asociații au fost: protonul este constituit dintr-un quark d și două quar-

kuri u (deci uud, iar sarcina electrică va fi suma algebrică $+2/3+2/3-1/3=1$); neutronul are structura udd (adică sarcina $+2/3-1/3-1/3=0$).

Barionii și quarkurile

După ce a fost acceptată regula importantă că *barionii sînt combinații de trei quarkuri*, modelul a permis fizicienilor să alcătuiască combinații (teoretice) pentru toți hadronii cunoscuți, luînd în considerare numerele cuantice corespunzătoare: numărul barionic, spinul, sarcina și stranietatea. Iată, de pildă, o astfel de analiză, pentru barionul delta-plus-plus, care are $B=+1$, sarcina electrică, $Q=+2$, spinul, $J=3/2$ și stranietatea $S=0$. De la început se elimină quarkul s din componența sa. Dacă s-ar lua însă combinația $s\bar{s}$, se obține într-adevăr $S=+1-1=0$, iar în acest caz B va fi $+1/3-1/3=0$ și cu încă un quark nu se va mai putea obține $B=+1$!

Atunci, ce combinație poate fi folosită pentru a obține ca rezultat cele trei numere cuantice, B, Q, S de mai sus? Evident, pentru $Q=+2$ este necesar să se asocieze trei quarkuri u ($Q=+2/3+2/3+2/3=+2$). De asemenea, pentru a obține spinul $J=3/2$, cele trei quarkuri u corespund, avînd fiecare spinul $+1/2$ ($+1/2+1/2+1/2=+3/2$). Înseamnă că barionul delta-plus-plus trebuie să fie constituit din combinația uuu, avînd spinii orientați în același sens.

O situație mai interesantă o prezintă rezonanța delta-plus ($S=0$, $Q=+1$, $J=3/2$, $B=+1$). O analiză rapidă precizează că cele trei quarkuri trebuie să aibă spinii orientați în același sens și că nu poate exista în combinație nici un antiquark (la care $B=-1/3$). În ce privește sarcina electrică $Q=+1$, se poate obține din combinația $+2/3+2/3-1/3=+1$. Deci grupul de quarkuri corespunzător particulei delta-plus este uud. *Dar aceeași combinație a fost atribuită și protonului!* Care este deosebirea?

Protonul are caracteristicile cuantice $S=0$, $Q=+1$, $J=+1/2$ și $B=+1$. Deci diferă de particula delta-plus doar în ce privește spinul: are valoarea $+1/2$ față de $+3/2$. Astfel, un posibil aranjament al quarkurilor ar fi acela în care, de pildă, quarkul d are spinul orientat în sens opus. Atunci rezultă spinul $+1/2+1/2-1/2=+1/2$, care explică „agregatul proton".

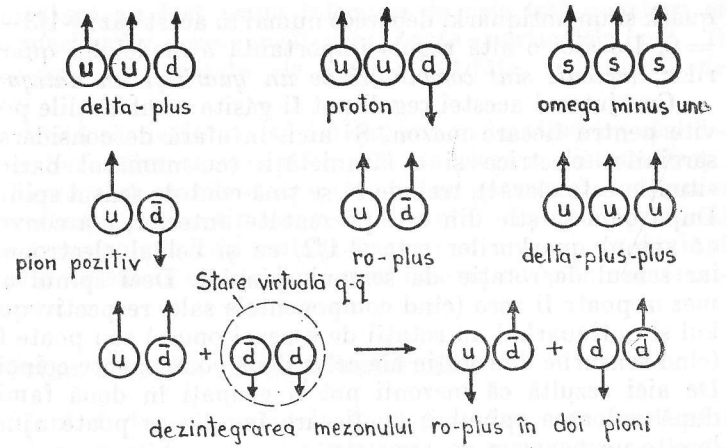


Fig. 31. Combinații de quarkuri — aproape un joc distractiv.

Analog pot fi stabilite combinații pentru sigma-plus *(uus)*, lambda-zero *(uds)*, sigma-zero *(uds)*, xi *(uss)* etc.

Pe lîngă aceste combinații, care par mai degrabă un „joc enigmistic", au putut fi rescrise cele două simetrii, hexagonală și triunghiulară, ca în figură.

În aceeași manieră pot fi sistematizate și antiparticulele, dar ele conțin antiquarkuri. În acest caz se va ține cont de faptul că numerele cuantice corespunzătoare au semne opuse.

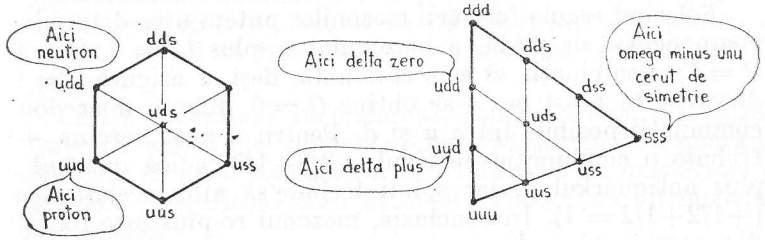


Fig. 32. Hexagonul și triunghiul de simetrizare în varianta quarkurilor.

Mezonii și quarkurile

Cum explică modelul quarkurilor componența mezonilor? Faptul că mezonii au numărul barionic $B=0$, singura combinație posibilă pentru a da acest rezultat este $q\bar{q}$, adică un

quark și un antiquark, deoarece numai în acest caz: $+1/3-1/3 = 0$. De aici o altă regulă importantă a modelului quarkurilor: *mezonii sînt combinații de un quark și un antiquark.*

Cu ajutorul acestei reguli pot fi găsite combinațiile potrivite pentru fiecare mezon. Și aici, în afară de considerarea sarcinilor electrice și a stranietății (cu numărul barionic situația este clară!), trebuie să se țină cont de sensul spinilor. După cum se știe din cele prezentate anterior, s-a convenit că spinul quarkurilor este $+1/2$, ca și cel al electronului, iar sensul de rotație dă semnul spinului. Deci spinul unui mezon poate fi zero (cînd componentele sale, respectiv quarkul și antiquarkul au rotații de sensuri opuse) sau poate fi 1 (cînd sensurile de rotație ale celor două componente coincid). De aici rezultă că mezonii pot fi grupați în două familii, după valoarea spinului; cu fiecare familie se poate ajunge la cîte un hexagon de simetrie.

O observație interesantă! Mezonii cu spinul zero se deosebesc de cei cu spinul 1 prin faptul că sînt mai „ușori". În cazul barionilor, așa cum s-a arătat anterior, fiecare fiind format din trei quarkuri, spinul poate fi 1/2 (cînd două quarkuri au spinul de același semn) sau 3/2 (cînd toate quarkurile au spinul de același semn). Barionii cu spinul 1/2 sînt mai „ușori" decît cei cu spinul 3/2 (numiți și rudele îndepărtate ale protonului).

Extinzînd domeniul la antiparticule, și antimezonii sînt identici cu particulele corespunzătoare, deosebirea constînd doar în semnele de sens opus ale numerelor cuantice.

Folosind regula formării mezonilor putem ușor determina componența, de pildă, a mezonului ro-plus ($S = 0$, $Q = 1$, $J = 1$). Combinația $s\bar{s}$ este eliminată, deși ar asigura $S = 0$, deoarece în acest caz s-ar obține $Q = 0$. Rămîn doar două combinații posibile între u și d. Pentru a avea sarcina $+1$ trebuie o combinație de tipul $+2/3+1/3$, adică quarkul u plus antiquarkul $\bar{d}$, iar spinii trebuie să aibă același sens ($+1/2+1/2 = 1$). În concluzie, mezonul ro-plus este format din combinația $u\bar{d}$.

Pe baza acelorași reguli, pionul-plus ($S = 0$, $Q = +1$, $J = 0$) se obține, de asemenea, din combinația $u\bar{d}$, dar pentru a avea spinul zero, cele două quarkuri componente vor avea spinii în sensuri opuse!

Modelul quarkurilor a reprezentat un pas important în dialectica complexitate-simplificare. Sutele de particule

elementare au fost acum înlocuite de cele trei quarkuri și antiquarkurile corespunzătoare; toate particulele pot fi imaginate ca agregate ale acestor entități, considerate de bază.

Merită să fie făcută și o mențiune în legătură cu stabilitatea barionilor și mezonilor atît de elegant sistematizați. Pe Terra sînt stabili doar protonul și neutronul, iar într-o lume făcută din antimaterie ar fi stabili doar antiprotonul și antineutronul. Toți ceilalți barioni și mezoni au o viață extrem de scurtă atît în Universul nostru, cît și într-un anti-univers.

Prima dovadă a existenței quarkurilor

Unul dintre argumentele majore în favoarea modelului quarkurilor este enormul său succes în explicarea și „codificarea" hadronilor. Toate clasificările discutate în trecut, considerînd barionii și mezonii particule ca atare, nu au reușit să reducă confuziile și aglomerarea pînă la un punct la care să poată fi descifrat un model. Dar o dată cu introducerea conceptului că fiecare particulă corespunde unei anume aranjări de quarkuri, situația s-a schimbat. Acum se poate vedea cum familii de particule sînt toate înrudite între ele într-o manieră fundamentală: toate sînt compuse din quarkuri.

În ultimele două decenii, fizicienii au „întors pe toate fețele" modelul quarkurilor. Unii pentru a verifica dacă nu cumva predicțiile modelului sînt greșite, iar alții pentru a constata ce fel de informații noi asupra particulelor pot fi cîștigate.

Ce s-a constatat? În orice caz, concluzia este surprinzătoare: nu există nici o particulă prezisă de modelul quarkurilor care să nu fi fost găsită. Dar totodată, nu există nici o particulă identificată care să nu-și găsească loc în modelul quarkurilor.

Poate acesta este și motivul principal pentru care fizicienii au acceptat atît de repede modelul. Iar pentru a putea „gusta" din succesul rolului de „prezicător" al modelului, este interesant să fie amintită descoperirea cea mai spectaculoasă, anume a particulei prezisă ca fiind „omega-minus unu". Potrivit prezicerii, această particulă avea să aibă

următoarele caracteristici: $Q = 1$, $S = -3$, $B = 1$, $J = +3/2$, iar masa a fost estimată la circa 1,68 GeV/c^2.

O dată predicția făcută, a început goana după detectarea experimentală a particulei. În februarie 1964, un grup de cercetători de la Laboratorul Brookhaven a raportat primul eveniment în care a apărut particula „omega-minus unu", înregistrat într-o cameră cu bule. Evenimentul a fost identificat în urma trierii a... 100 000 de fotografii. După cum povestește un fost student al Universității Stanford, J. Trefil, vestea s-a răspîndit rapid în instituție, iar grupuri de profesori și studenți constituite ad-hoc purtau discuții aprinse asupra implicațiilor descoperirii.

Se poate ușor imagina importanța pe care fizicienii au acordat-o acestei descoperiri, pe drept cuvînt considerată epocală; articolul prin care s-a comunicat detectarea și identificarea particulei a fost semnat de... 33 de autori! În afară de potrivirea celorlalte caracteristici prezise, valoarea constatată pentru masă — de 1,67 GeV/c^2 este cu totul remarcabilă.

Descoperirea particulei omega-minus unu a fost pentru fizicieni cea mai importantă dovadă a existenței quarkurilor.

Situația se complică din nou

Un aspect al sistematizării oricăror procese îl reprezintă simetria. Și natura construiește simetric. Fizicienii cunosc rolul simetriei și în multe fenomene, nu de puține ori, simetria a dus la elaborarea unor teorii, care ulterior au fost confirmate de experiență. Uneori, chiar experiențele sugerează simetrizări.

Timp de 10 ani, din 1964 pînă în 1974, fizicienii au suportat asimetria tabloului quarkurilor și antiquarkurilor. Adică, existau două quarkuri cu sarcina electrică $-1/3$ (*d* și *s*) și doar un singur quark cu sarcina $+2/3$ (*u*). De la început au existat sugestii pentru completarea tabloului cu încă un quark, cu sarcina $+2/3$, pentru simetrizare, dar, ciudat, fizicienii nu erau interesați pentru această completare simetrică.

Dar în zece ani de experiențe au fost acumulate suficiente rezultate a căror explicare cerea introducerea în schemă a unui nou quark. Descoperitorul său teoretic, S. Glashow, a atribuit celui de-al patrulea quark o calitate pe care a

numit-o „charm" (farmec), dar fizicienii preferă prozaicul nume de quark *c*.

Totuși, într-un fel (sentimental!) poate fi justificat numele de „farmec", prin noua imagine generală pe care a adus-o grupului de quarkuri. Într-adevăr, imaginea noului tablou de quarkuri apărea *fermecătoare:* un cvartet de quarkuri (*u*, *d*, *s* și *c*) și un cvartet de leptoni (e, υ_e, μ și υ_μ).

Quarkul *c* s-a presupus a fi cel mai „greu" și astfel se sugera că particulele pe care le compune vor fi cele mai grele.

A urmat, evident, „goana după farmec", în toate marile laboratoare. Particulele cu farmec, potrivit teoriei, urmau să aibă masa în jur de 3 GeV/c^2. Cum și între echipele de cercetători se manifestă rivalități, în jurul cercetărilor se ținea un oarecare secret. De aceea povestea descoperirii particulelor cu „farmec" are un oarecare... farmec.

În octombrie 1974, S. Ting (echipa de cercetători din Brookhaven) a „văzut" o particulă de 3,1 GeV/c^2, dar nu a îndrăznit să comunice rezultatele, nefiind prea sigur de exactitatea măsurătorilor. Masa particulei era de circa 3 ori mai mare decît cea a protonului și a fost botezată *particula J*. Nu mai exista nici o îndoială asupra faptului că era o particulă (și nu o rezonanță), deoarece trăia cam de 1 000 de ori mai mult decît o rezonanță.

Dar la un alt laborator (din Stanford), de asemenea, în octombrie 1974, B. Richter descoperă și el o astfel de particulă, pe care a numit-o *particula psi* (ψ).

Cum comunicările celor două laboratoare s-au întîlnit în aceeași publicație („Physical Review Letters"), au ieșit niște discuții, care însă s-au terminat cu bine, particulei atribuindu-se o dublă... paternitate: *particula J/psi*. De fapt, dubla descoperire a fost o garanție a valorii experiențelor făcute cu aparaturi diferite și măsurători care se completau reciproc.

Noua particulă a mobilizat întreaga lume a fizicii particulelor elementare. Teoreticienii și-au comunicat poziția lor: particula J/psi se compune dintr-un quark *c* și un antiquark $\bar{c}$. (Are o viață medie de 10^{-20} s, prea scurtă pentru interacțiile slabe, dar de 1 000 de ori mai lungă decît interacțiile tari.)

Potrivit acestei scheme teoretice, particula J/psi ar fi un *quarkoniu*, adică un sistem cuantic legat asemănător

pozitroniului (sistem legat electron-pozitron) și trebuie să prezinte un mare număr de stări excitate (ca un atom).

Adepții schemei au avut o perioadă de descoperiri încurajatoare. Laboratoarele anunțau punerea în evidență de particule J/psi cu diverse stări de excitație, ceea ce confirma ipoteza teoretică a structurii $c\bar{c}$.

Dar, în curînd a început să se strecoare o îndoială. Toate aceste descoperiri fundamentale nu excludeau posibilitatea ca particula J/psi să fie o structură care să cuprindă doar cele trei quarkuri cunoscute (fără quarkul *c*), dar alcătuind o combinație de energie mai mare. Sau, în compoziția particulei J/psi s-ar putea să fie quarkuri care să posede cele trei „arome" cunoscute (*u*, *d*, *s*), plus „aroma" *c*. O astfel de particulă, avînd toate cele patru „arome" a fost numită particulă cu „farmec dezvelit" (naked charm); ea ar pune în evidență toate caracteristicile noii calități a materiei.

A trecut peste un an și jumătate de așteptare pentru adepții „farmecului". Ei au elaborat schema de comportare a unei particule cu „farmec" și acum se aștepta o confirmare experimentală. Potrivit predicțiilor făcute, o particulă cu farmec va trăi foarte puțin, iar dezintegrarea sa ar avea o succesiune precisă: quarkul *c* se va transforma într-un quark *s*, eliminînd cîteva particule pentru conservarea energiei și a sarcinii electrice. Apoi, particula „stranie" *(s)* se va dezintegra prin 2—3 particule normale. Aceasta era secvența pe care o așteptau teoreticienii care preziseră „farmecul".

Așteptarea le-a fost răsplătită; cîteva din evenimentele prevăzute de ei au fost identificate în zecile de mii de fotografii făcute în laboratoare. Dar rezultatele, deși sprijineau existența „farmecului", nu spuneau nimic despre această nouă calitate a materiei. A început din nou o căutare insistentă pentru izolarea unor particule cu „farmec dezvelit", avînd masa prevăzută de S. Glashow.

Și de data aceasta experiențele au confirmat teoria: au fost descoperite concomitent un mezon cu „farmec" și un antiproton cu „farmec". Noua particulă, mezonul cu „farmec" era identică cu cea prezisă de S. Glashow: avea masa de circa 1,8 GeV/c^2, se dezintegra după schema anunțată și era o combinație de quark *c* și un antiquark $\bar{c}$. Antimezonul său (care se năștea simultan cu mezonul) era compus dintr-un quark *u* și un antiquark $\bar{c}$.

Iar celebra particulă J/psi este astăzi cunoscută ca fiind un mezon alcătuit dintr-un quark *c* și un antiquark $\bar{c}$, și este într-adevăr un *quarkoniu* (de fapt, *charmoniu*), o stare legată analoagă cu un atom artificial.

Întrucît avalanșa de particule detectate în laboratoare a epuizat posibilitățile de notare cu litere grecești, noul mezon cu „farmec" a fost numit D^0. Curînd s-a dovedit însă că există o întreagă familie de mezoni *D*. Aceștia au fost numiți D^0, $\overline{D^0}$, D^+ și D^- și s-a stabilit că au în componența lor configurațiile respective: $(c\bar{u})$, $(\bar{c}u)$, $(c\bar{d})$ și $(\bar{c}d)$.

Mezonii din familia *D* conțin deci o nouă „aromă" — farmecul — și, de aceea, pot să se dezintegreze numai printr-o interacție slabă, de pildă $c \to s\bar{e}\upsilon$ sau $c \to d\bar{e}\upsilon$. Aceste dezintegrări au fost observate experimental și timpul de viață al mezonului *D* a fost măsurat la 10^{-13} s, o valoare apropiată pentru un proces de interacție slabă.

A fost pus în evidență și protonul cu „farmec", precum și antiprotonul cu „farmec". Primul are structura *(udc)*, ar al doilea $(\bar{u}\bar{d}\bar{c})$.

Alertă în lumea leptonilor

Succesele experimentale obținute de teoria „farmecului" au convins. O dată cu vizualizarea particulelor cu „farmec", noua „aromă" a materiei a fost acceptată de fizicieni. De data aceasta ei credeau că bazele materiei erau pe deplin cunoscute, avînd ca suport omologarea tabelului cu patru quarkuri, patru leptoni și antiparticulele acestora. Toată lumea era de acord cu aceste concluzii, cu excepția... naturii. Pe nesimțite, în toiul frămîntărilor pentru punerea în evidență experimentată a *farmecului* nu s-a acordat prea mare atenție comunicării că este posibilă existența unui electron supergreu, cu o masă care l-ar plasa în categoria rudelor grele ale protonului.

Astfel că, o dată trecută euforia „farmecului", care de acum și-a asigurat locul, fizicienii s-au îndreptat spre noul venit, care „le cam încurca socotelile".

Electronul supergreu, identificat din înregistrările cercetătorilor, a fost numit particula tau (τ) sau *taon* și potrivit datelor obținute se dezintegra în 2.10^{-12} s într-un electron normal, eliberînd surplusul de energie sub formă de neutrini.

Neutrinul era deosebit de ceilalți neutrini, și a fost numit *neutrin taonic*. Masa electronului supergreu a fost estimată la 1,8 GeV/c^2, adică de circa două ori cît masa unui proton, astfel că apartenența lui la familia leptonilor nu se prea justifica.

Calculele fizicienilor erau acum încurcate și din alt punct de vedere. Întrucît leptonii sînt cele mai simple particule, se spera că ei vor permite să se găsească o explicație asupra semnificației masei. Căci pînă în prezent nu s-a găsit nici o explicație a faptului că masa electronului este de 0,5 MeV/c^2, a electronului greu este de 105 MeV/c^2, iar acum a apărut și masa electronului supergreu, cu masa de 1,8 GeV/c^2...

Alți candidați în lumea quarkurilor

Descoperirea electronului supergreu, sau taonul, a ridicat la șase numărul leptonilor. De fapt, situația din lumea leptonilor se înscria într-o schemă, elaborată de fizicianul H. Harari, care prevedea că există un număr de 6 quarkuri și 6 leptoni.

Deci, din schema lui Harari, cele 6 quarkuri ar fi *u*, *d*, *s*, *c* și două quarkuri noi, pe care le-a numit „top" (vîrf) și „bottom" (bază), dar în concordanță cu fantezistele nume date celorlalte quarkuri, fizicienii le-au rebotezat „truth" (adevăr) și „beauty" (frumusețe). Din toate aceste glume, azi au rămas doar inițialele, *b* și *t*.

Cei șase leptoni din schema lui Harari sînt: electronul cu neutrinul său, miuonul (electronul greu) cu neutrinul miuonic și taonul (electronul supergreu) cu neutrinul taonic.

Electronul supergreu sugerează, pentru simetria tabloului, că noile quarkuri, *b* și *t*, ar trebui să aibă mase cu adevărat impresionante, pentru a echilibra valorile experimentale.

Nu a trecut mult timp de la comunicarea predicției lui Harari, de existența a două quarkuri noi, că un grup condus de Leon Lederman de la *Fermilab*, în cadrul Conferinței de fizica particulelor nucleare, din 1977, a făcut o comunicare ce a constituit o mare surpriză. Este vorba de descoperirea unei particule cu o masă de 9,4 GeV/c^2 (de circa 3 ori masa particulei J/psi), observată în spectrul de masă al unei perechi de miuoni produși într-o coliziune de protoni cu nuclee. Experimentul original a sugerat că structura observată poate, de fapt, să fie compusă din mai multe stări, foarte apropiate.

În orice caz, structura descoperită la *Fermilab*, încă din anul 1976, a fost numită y-psilon (Υ). La început au fost puse în evidență două stări: y-psilon și y-psilon prim, apoi, în 1979 a fost identificată starea y-psilon secund, iar la începutul anului 1980 a fost descoperit cel de-al patrulea membru al familiei, y-psilon terț.

Masele acestor stări, de circa 10 GeV/c^2, de fapt postulează existența quarkului *b*, preconizat să aibă o masă de 5 GeV/c^2.

Potrivit studiilor, particulele y-psilon sînt stări legate $b\bar{b}$ și de aceea transportă exact zero „frumusețe", ceea ce, de fapt, nu permite identificarea existenței quarkului *b*. Ultima dovadă a existenței acestei noi arome cere descoperirea de particule care să conțină un quark *b* legat de quarkuri „ordinare". Cel mai ușor astfel de sistem poate fi compus dintr-un quark *b* și un antiquark $\bar{u}$ sau $\bar{d}$.

Cele două sisteme $(b\bar{u})$ sau $(b\bar{d})$ au fost numite, încă înainte de descoperirea lor, mezoni *B*. Ei au fost într-adevăr detectați, în 1982, ca produse de dezintegrare a stării y-psilon-terț, singurul membru al familiei y-psilon care posedă energie suficient de mare.

Quarkul *b* se caracterizează și el ca o entitate deosebită. Din calcule rezultă că masa sa este de circa 4,7 GeV/c^2, adică de trei ori mai mare decît masa quarkului *c*.

Descoperirea mezonului *B* nu numai că dovedește existența quarkului *b*, dar totodată a arătat că fizica teoretică are mijloacele de a confrunta „provocările".

Scurtă privire asupra sistematizării

După o serie de etape amețitoare, pline de descoperiri ce se dovedeau fiecare de o mare însemnătate pentru mersul înainte al cercetărilor și al teoriilor, ar fi utilă o scurtă prezentare a rezultatelor la care s-a ajuns.

O concluzie esențială este aceea că particulele subnucleare constituie sisteme dinamice, care pot lua parte la diverse interacțiuni. Intensitatea acestor interacțiuni depinde de gradul lor de organizare. De pildă, hadronii (barionii și mezonii), cei între care au loc interacții tari, au o structură internă relativ complexă față de leptoni (electronul, miuonul,

taonul și neutrinii corespunzători), care participă doar la interacții slabe și electromagnetice.

Apoi a apărut modelul quarkurilor, care a completat (și complicat!) imaginea particulelor elementare. Potrivit acestui model, hadronii sînt formați din quarkuri și antiquarkuri, în diverse combinații, care au fost discutate în secțiunile anterioare. Întrucît prin modelul quarkurilor se explică toate observațiile experimentale, se poate spune că quarkurile și cîmpurile sînt singurele entități materiale fundamentale. În concordanță cu acest punct de vedere, quarkurile și leptonii ar fi cărămizile de bază ale materiei.

Dar, oare, această concluzie reprezintă realitatea? Pentru acest stadiu al rezultatelor (și posibilităților) experimentale, cît și al teoriilor, răspunsul este: da.

Realitatea fizică a quarkurilor. Spre deosebire de leptoni, care au putut fi studiați în nenumărate experimente, niciodată nu au fost observate quarkuri libere. Totuși, dovezile asupra existenței lor devin din ce în ce mai numeroase. O astfel de indicație asupra validității modelului quarkurilor îl reprezintă succesul prezicerii rezultatelor coliziunilor electron-pozitron, la energii foarte înalte. Din cauză că cele două particule reprezintă materie și antimaterie, în procesul de coliziune ele se anihilează, eliberînd energia sub formă de fotoni.

Modelul quarkurilor prezice că energia fotonului se poate materializa într-un quark și un antiquark. Iar, din cauză că perechea pozitron-electron au momentul rezultant zero, perechea quark-antiquark $(q\bar{q})$, care iese din interacție, trebuie să se „despartă" în sensuri opuse, cu viteze egale, astfel încît și momentul lor rezultant să fie zero.

Din nefericire însă quarkurile vor trece neobservate, deoarece pe seama energiei lor apar quarkuri și antiquarkuri suplimentare, care se materializează și se combină cu perechea originală, generînd două jeturi de hadroni (de obicei pioni). Astfel de jeturi au fost într-adevăr observate în înregistrările făcute la coliziunile electron-pozitron de energii foarte înalte. Totodată, s-a observat un eveniment deosebit de important, anume că punctul lor de plecare nu are ca origine punctul de coliziune, ci pleacă din particule izolate, *invizibile*, ale căror traiectorii sînt conservate de jeturile de hadroni. (Adică, pe o mică distanță quarkurile s-au mișcat liber!) Astfel, experimentul a confirmat strălucit previziunile teoretice ale modelului quarkurilor.

Dar mai există și alte dovezi. De pildă, pentru realitatea quarkurilor pledează și varietatea nivelelor de energii, sau mase, la care pot fi

observate anumite specii de hadroni, în special particulele J/psi și y-psilon. Astfel de spectre ale energiilor apar ca analoage spectrelor atomice: ele par să reprezinte stări cuantice ale unui sistem legat, format din două mici componente. Fiecare din aceste stări cuantice ar reprezenta o stare de excitație diferită, precum și combinații diferite ale spinilor și mișcărilor orbitale ale componentelor. Pentru cei mai mulți fizicieni pare irezistibilă concluzia că cele două particule reprezintă quarkuri.

Quarkurile s-au dovedit a fi bine zăgăzuite în interiorul particulelor și, cum se va arăta în continuare, există o teorie care explică imposibilitatea izolării lor. A rămas, deocamdată, doar posibilitatea studierii lor prin intermediul coliziunilor de particule și antiparticule, iar experimentele de acest tip au identificat 5 tipuri (arome) de quarkuri: u, d, s, c, și b (bineînțeles, există și antiquarkurile respective). Tabloul de simetrie preconizat de H. Harari prevede însă și un al șaselea tip, quarkul t, care însă nu și-a făcut încă apariția în public.

Quarkul t. Schema existenței a șase quarkuri a fost acceptată de fizicieni atît pentru simetria pe care o etala, cît mai ales pentru faptul că unele quarkuri propuse au fost detectate experimental. Cu excepția însă a quarkului t, care este presupus a fi atît de masiv încît pentru a fi pus în evidență sînt necesare acceleratoare de energii extrem de înalte. Însă o analiză preliminară a datelor teoretice furnizate de existența purtătorilor forței slabe (bosonii vector intermediari W^+, W^- și Z°, care vor fi prezentați într-o secțiune următoare) sugerează că există și quarkul t.

Pentru detectarea quarkului t, un rol important i se atribuie perechii sale de dublet, quarkul b. Quarkului b i se atribuie unele proprietăți interesante. În procesul interacțiilor în care intervin quarkuri se presupune că tipul de dezintegrare a quarkului b este relativ lent. Dar acest „lent" trebuie înțeles la scara microcosmosului. Deși la nivelul percepției umane timpul de dezintegrare a quarkului b, de 10^{-13} — 10^{-1} s este de neimaginat, se poate totuși considera o concretizare: dacă un corp s-ar mișca cu o viteză reprezentînd 10% din viteza luminii (adică 30 000 km/s!), în timpul de 10^{-13} s s-ar deplasa pe o distanță de 0,002 mm.

Dar partea interesantă a procesului de dezintegrare a quarkului b o constituie interpretarea sa teoretică. Astfel, procesul poate avea trei posibilități. Prima ar fi că dezintegrîndu-se, quarkul emite un boson

W^- și se transformă într-un quark *c* sau *u*. O altă alternativă ar fi ca quarkul *b* să emită un boson Z°, transformîndu-se în quark *s* sau *d*. Această cale este deosebit de importantă pentru cercetători: prin faptul că este implicat bosonul Z°, procesul este interzis în cazul în care quarkul *b* face parte dintr-un dublet cu un quark *t* — deci o semnătură pentru existența quarkului *t*.

A treia cale posibilă de dezintegrare a quarkului *b* ar fi fără emitere de bosoni W^- sau Z°, pe căi absolut noi.

Detectarea quarkului *t* prin urmărirea celei de a doua alternative de dezintegrare a quarkului *b* cere încă mari eforturi din partea cercetătorilor. Deși există păreri pozitive, întrebarea rămîne totuși, pînă la confirmarea experimentală: oare, există quarkul t? Căci dacă nu există, teoria dezintegrării quarkurilor va intra în criză...

În ceea ce privește cealaltă familie a „cărămizilor de bază" ale naturii, a leptonilor, aceasta este formată din asemenea, din șase membri. Situația leptonilor și a quarkurilor este prezentă sistematic în tabelul următor.

Dublet sau generație	Leptoni (arome)	Sarcina	Quarkuri (arome)	Sarcina
I	neutrinul electronului	0	*u*	+ 2/3
	electron	— 1	*d*	— 1/3
II	neutrinul miuonului	0	*c*	+ 2/3
	miuon	— 1	*s*	— 1/3
III	neutrinul taonului	0	*t*	+ 2/3
	taon	— 1	*b*	— 1/3

— la care se adaugă și antiparticulele corespunzătoare.

Chiar dacă se confirmă schema celor 6 leptoni și 6 quarkuri (cu antiparticulele corespunzătoare), totuși mai rămîn cîteva întrebări profunde despre dubletele de quarkuri și leptoni. O imagine satisfăcătoare a lumii poate fi de acum explicată prin existența unui singur dublet de leptoni (electronul și neutrinul său și un singur dublet de quarkuri *(u* și *d)* Cu toate acestea, potrivit tabelului de sistematizare alăturat, se pare că există trei dubleți din fiecare tip... și cine știe cîți vor mai fi descoperiți! De ce natura se comportă atît de neeconomic? Ce înseamnă „aroma", care deosebește tipurile. de quarkuri? Ce relații există între dubleți și prin ce diferă unii de alții?

Întrebări...

Quarkurile și culoarea

Din nou complicații. Totul a pornit de la principiul excluziunii (Pauli), care ar putea fi formulat și astfel: „două particule identice, de spin 1/2 (fermion), nu pot ocupa aceeași stare cuantică". Aplicat la atomi, acest principiu justifică întreaga structură a sistemului periodic al elementelor.

Întrucît și quarkurile sînt entități cu spinul 1/2, există o puternică tendință din partea teoreticienilor de a considera că și quarkurile trebuie să se supună acestui principiu. Dar, spre surprinderea lor, există cel puțin o particulă care nu se supunea principiului excluziunii. Este vorba de rezonanța delta-plus-plus, care, așa cum s-a arătat anterior, este o combinație de trei quarkuri *u*, avînd spinii orientați în același sens (pentru a se obține spinul 3/2).

Dacă aceste quarkuri ar asculta de principiul excluziunii, particula delta-plus-plus n-ar putea exista, deoarece toate cele trei quarkuri constituente, de spin 1/2, au aceeași stare cuantică!

Astfel, fizicienii s-au aflat în fața dilemei: ori quarkurile *nu se supun* principiului, ori quarkurile care compun particula delta-plus-plus *nu sînt identice*

S-a ales calea a doua, presupunînd că cele trei quarkuri nu sînt identice în sensul cerut de principiul excluziunii. Dar, întrucît ele au totuși același spin, aceeași sarcină etc. diferența dintre ele ar trebui să fie o caracteristică *încă neluată în seamă.*

Dar ce fel de caracteristică? Dacă ar fi să ne amuzăm, să presupunem că în lumea quarkurilor și-ar face apariția un „spiriduș" care, avînd la dispoziție vopsele, ar colora fiecare din cele trei quarkuri cu cîte o anume culoare. O astfel de situație ar soate cele trei quarkuri din „starea de identitate".

De fapt, ideea de culoare a fost introdusă (sub alt nume) de Oscar W. Greenberg, de la Universitatea din Maryland (S.U.A.) aproape simultan cu lansarea modelului quarkurilor, în 1964, dar abia relativ recent conceptul a fost pe deplin acceptat. Întîrzierea era inevitabilă, deoarece nici o particulă nu și-a manifestat explicit un număr cuantic de „culoare". Dacă această caracteristică ar fi fost observată, ea ar fi fost recunoscută, cum de altfel s-au petrecut lucrurile cu „farmecul" și cu „frumusețea". Or această „discreție" a calității duce la o regulă care statuează că, deși fiecare quark, separat, ar putea avea o „culoare", totuși „culoarea" netă a unui agregat de quarkuri (care ar putea fi suma „culorilor" quarkurilor), respectiv a unei particule cunoscute, trebuie să fie zero (sau, în termeni de culoare — albă, incoloră sau neutră).

Teoreticienii și-au însușit ideea noului „număr cuantic" și au elaborat o teorie asociată, care se va dovedi estrem de utilă în explicarea și dezvoltarea modelului quarkurilor: *cromodinamica cuantică*. După cum sugerează numele, această teorie prezice existența unei noi forțe universale — *forța de culoare*, iar purtătorul forței este considerată o particulă care a fost numită *gluon*, un boson vector (de spin 1).

Această forță se caracterizează prin faptul că este mult superioară forței tari nucleare sau oricărei alte forțe cunoscute în Univers. În același timp, teoria prezice o nouă calitate a materiei, asemănătoare sarcinii electrice, care a fost numită *culoare*. Cercetătorii au acceptat numele de culoare, deoarece s-a observat că quarkurile și forța ce le leagă se comportă conform unei scheme matematice similare combinării culorilor.

Ca și în cazul sistematizării quarkurilor, imaginea quarkurilor „colorate" este deosebit de elegantă și completă, încît autorii insistă că ea trebuie să fie adevărată. Adică, antecedentele conduc la o astfel de concluzie.

Dar în cazul acceptării termenului de „culoare" trebuie multă atenție. Oricum, nu trebuie să se înțeleagă că quarkurile sînt într-adevăr colorate în sensul pe care îl cunoaștem, deși termenul „încurajează" această imagine. Totul este o convenție de sistematizare, care este astfel organizată încît toate particulele observabile să apară „albe", albul rezultînd din combinarea diferitelor culori, potrivit regulilor de amestecare a culorilor.

Newton a demonstrat experimental cum se poate obține alb prin amestecarea culorilor, folosind un disc pe care erau desenate sectoare de cerc colorate. Rotind discul, sectoarele colorate, prin suprapunere datorită remanenței optice, vor da culoarea albă.

Teoria culorilor presupune existența a trei culori de bază, numite fundamentale (de pildă, roșu, galben și albastru). Dacă pe discul lui Newton se pun trei sectoare cu unele nuanțe ale acestor trei culori, prin rotirea discului se obține culoarea albă. Fiecare culoare fundamentală are și o culoare complementară (sau anticuloare), care are proprietatea că „adunată" cu culoarea fundamentală corespunzătoare produce culoarea albă. De pildă, roșu ale complementara verde (sau antiroșu), albastru are complementarea portocaliu (sau antialbastru), iar galben are complementara violet (sau antigalben). Unii autori explică aceeași lege folosind alte culori de bază: roșu, albastru și verde sau roșu, indigo și verde. Întrucît este o problemă convențională, se poate opta pentru oricare combinație, reținînd de fapt esența, care justifică proprietățile de legătură ale quarkurilor: alb se obține prin adunarea celor trei culori fundamentale sau a celor trei anticulori fundamentale, precum și prin adunarea unei. culori fundamentale cu anticuloarea sa (complementara).

Orice altă combinație nu va mai da alb, ci o culoare intermediară.

Asemănător acestor combinații, dacă se atribuie quarkurilor cîte o culoare, se pot identifica acele combinații permise pentru a putea obține, prin combinarea lor, culoarea albă. De exemplu, se poate spune că un proton este compus din trei quarkuri, avînd respectiv culorile roșu, galben și albastru. Un antiproton va fi compus din trei antiquarkuri de culori complementare (anticulori): antiroșu, antialbastru și antigalben.

Sau, mezonii conțin cîte un quark de orice culoare fundamentală și un antiquark de anticuloarea corespunzătoare.

Teoria cromodinamicii cuantice nu prevede alte condiții pentru culoarea quarkurilor, ele putînd fi oricare din tipurile *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, sau *t*. Mai mult încă, cele trei culori ale quarkurilor (roșu, galben și albastru) se pot schimba după necesitățile sistematizării.

La rîndul lor și purtătorii forței de culoare, gluonii, sînt presupuși de teorie să fie „colorați". Fiecare gluon poate fi

considerat ca o combinație asemănătoare mezonului: culoare-anticuloare. Diferența este că mezonii sînt reprezentați de acele combinații care dau culoarea albă (roșu-antiroșu, galben-antigalben, albastru-antialbastru), pe cînd gluonilor le sînt rezervate restul combinațiilor, care sînt însă „colorate": roșu-antigalben, roșu-antialbastru, galben-antiroșu, galben-antialbastru, albastru-antiroșu, albastru-antigalben.

Dar pentru a satisface simetria de grup este necesar să fie luați în considerare încă doi gluoni de noi combinații de culori (nu se știe cum!), astfel încît se presupune existența a 8 gluoni (față de cei 6 menționați), care formează astfel o familie asemănătoare cu cea a mezonilor.

Gluonii fac legătura între diferitele quarkuri, schimbîndu-le culorile prin interacții. Deoarece există 6 elemente de culoare operante — față de două elemente, plus și minus, cum există în cazul interacțiunii electromagnetice — s-a dedus că forța de culoare este mult mai puternică.

Forța de culoare

Existența forței de culoare a fost dovedită numai indirect, dar toate observațiile coincideau cu teoria cromodinamicii cuantice. Cum era de așteptat, noua forță avea unele caracteristici neobișnuite. Astfel, spre deosebire de celelalte forțe din Univers (electrică sau gravitațională), care devin mai puternice atunci cînd corpurile asupra cărora acționează sînt mai apropiate, forța de culoare devine mai puternică atunci cînd quarkurile se îndepărtează și, dimpotrivă, devine mai mică la distanțe mici între quarkuri.

Aceste caracteristici neobișnuite conduc la concluzia că libertatea quarkurilor este limitată la o zonă relativ mică, în „interiorul" particulei subnucleare pe care o constituie.

Răspunsul la întrebarea dacă pot exista quarkuri libere a cerut multă imaginație din partea teoreticienilor. Ideea care a întrunit cele mai multe accepții pornește de la considerarea că quarkurile sînt legate sub formă de „lanțuri". Deci gluonii, care fac legătura între quarkuri, ca purtători ai forței de culoare, nu se mișcă liberi prin particulă, ci sînt localizați în configurații de lanțuri de legătură.

Cromodinamica cuantică prevede o astfel de organizare a lanțurilor încît, prin felul de așezare, fiecare gluon anihilează culorile celor doi vecini ai săi, asigurînd în final culoarea albă a lanțului.

Lanțurile de gluoni sînt presupuse extrem de puternice și inextensibile. Orice încercare de a rupe lanțul și a smulge un quark ar cere o foarte mare energie. Dar, presupunînd că s-a reușit ruperea lanțului, s-ar izola în acest caz quarkul?

Răspunsul este: nu! Și iată de ce: se știe că fiecare gluon ar fi compus dintr-un quark de o anume culoare și un antiquark de o anticuloare. Atunci cînd se rupe „lanțul", în partea care a rămas cu particula, a rămas un nou quark (jumătatea

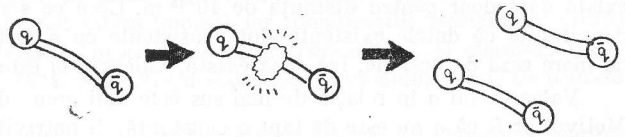


Fig. 33. Ruperea unui „lanț" de gluoni nu poate duce la separarea quarkurilor.

unui gluon), de aceeași culoare cu quarkul „eliberat". În felul acesta a fost modificată doar energia internă a particulei, lăsîndu-i însă nealterată forma inițială. În ceea ce privește quarkul „smuls", el nu este singur: la un capăt el va avea antiquarkul de anticuloarea sa. Deci întreaga operație (teoretică, bineînțeles) de a smulge un quark s-a soldat cu un rezultat neașteptat: s-a obținut o particulă ce conține un quark de o culoare și un antiquark de anticuloarea respectivă, adică... un mezon incolor!

Forța de culoare. Cromodinamica cuantică, teoria curentă a quarkurilor și a interacțiilor lor, sugerează că forța de culoare poate varia invers cu pătratul distanței atunci cînd quarkurile sînt foarte apropiate (reminiscențe ale legii lui Coulomb din electromagnetism), dar poate să-și asume o intensificare constantă pentru quarkuri care sînt relativ mai depărtate.

O cale plauzibilă pentru a explica o astfel de comportare ar fi să se admită că forța de culoare este pur și simplu suma unei forțe invers pătratice și o forță constantă. Acest model de lege a forței poate fi exprimat matematic printr-o expresie foarte simplă: $F = a/r^2 + b$, unde F este forța, r — distanța dintre quarkuri, iar a și b sînt constante care se determină experimental.

Acest model al forței de culoare poate fi testat prin încercările de a potrivi predicțiile sale cu datele unor stări legate dintre un quark și antiquarkul său (este vorba de quarkoniu, care va fi prezentat mai jos). În urma evaluării prin observare a unor date ale valorilor lui a și b, a reieșit că valoarea lui b, adică a forței constante, este de 16 tf($1{,}4 \cdot 10^5$N)! Cu alte cuvinte, două quarkuri se atrag reciproc cu o forță de cel puțin 16 tf, *indiferent la ce distanță se află!* Cunoscînd aceste date, este ușor de înțeles de ce nici un quark nu a putut fi extras dintr-un hadron.

Trebuie însă reținut că aceste argumente nu dovedesc că există o forță constantă între quarkuri; este greu de verificat atunci cînd există date doar pentru distanța de 10^{-15} m. Ceea ce s-a arătat este doar faptul că datele existente sînt consistente cu o forță constantă cu mare rază de acțiune, iar dacă există, valoarea ei este de 16 tf.

Valoarea lui a în relația de mai sus este mai greu de specificat. Motivul ar fi că a nu este de fapt o constantă, ci potrivit cromodinamicii cuantice depinde într-o mare măsură de r. Pentru distanțele explorate în sistemul unei stări legate (quarkoniu), a pare să aibă o valoare de 1/4, comparat cu 1/137 pentru constanta de proporționalitate din legea lui Coulomb.

Quarkoniul este numele generic pentru un „atom" făcut dintr-un quark greu și antiquarkul său. Este o stare legată, asemănătoare pozitroniului. În cazul „atomului pozitroniu", care consistă dintr-un electron și un pozitron, aflați într-o stare legată specială sub forma unui atom (de pildă, pozitronul ar fi nucleul, iar electronul se rotește în jurul său — de fapt se rotesc ambele), sistemul este ținut ca atare de binecunoscuta forță electromagnetică. În această legătură, electronul și pozitronul, care pot exista și în stare liberă, nu se anihilează reciproc.

Quarkoniul, deși analog în multe puncte cu pozitroniul, este însă cu mult mai exotic. Forța care acționează în quarkoniu este cea mai intensă cunoscută — forța de culoare —, considerată a fi la baza forței tari nucleare.

Fizicienii consideră quarkoniul ca un instrument unic cu care s-ar putea explora natura quarkurilor și forțele care acționează între ele. De aceea, o mare parte a eforturilor cercetătorilor se îndreaptă și spre studiul acestei stări speciale a materiei.

După cum se știe, toți hadronii cunoscuți pot fi interpretați ca agregate de quarkuri și antiquarkuri. Se părea că această varietate de hadroni va oferi ample posibilități de a explora forța dintre quarkuri. Dar în urma multor experimente cu protoni, pioni și alți hadroni „ordinari" s-a constatat că acestea pot produce doar informații indirecte

asupra forțelor care acționează între quarkuri. Motivul ar fi faptul că quarkurile u, d și s sînt foarte ușoare; într-adevăr, masa lor, cînd este exprimată în unități de energie, este comparabilă cu energia de legătură care ține quarkurile legate împreună în hadroni.

Ca rezultat, într-un hadron ordinar quarkurile se mișcă cu o viteză apropiată de cea a luminii, iar calculul proprietăților lor ar trebui să se facă folosind metode complicate din teoria specială a relativității. Pînă în prezent însă, astfel de calcule au fost dificil de rezolvat.

Aceste sisteme de quarkuri au fost numite relativiste și nu prezintă un interes prea mare pentru cercetători. Sînt de dorit sisteme legate de quarkuri mai grele, în care energia de legătură ar fi mai mică comparativ cu masa quarkurilor. Atunci quarkurile s-ar mișca mult mai lent decît viteza luminii, iar complicațiile teoriei relativității ar putea fi evitate. Un astfel de sistem nerelativist de quarkuri a fost găsit în anul 1974, respectiv descoperirea mezonului J/psi, cu o masă de 3 GeV/c^2.

Mezonul J/psi nu părea să fie alcătuit din vreo combinație a quarkurilor u, d sau s, deoarece toate combinațiile posibile au fost folosite deja la alcătuirea hadronilor cunoscuți. Oricum, cu 10 ani în urmă, J.D. Bjorken și S. Glashow au emis ideea că ar putea să fie un al patrulea quark, pe care l-a numit „farmec" (charm), notat mai simplu c. În 1970, S. Glashow și colegii săi I. Iliopoulos și L. Mariani au susținut, pe baze teoretice, că trebuie să existe quarkul c și al trebuie să fie substanțial mai greu decît celelalte quarkuri cunoscute. Mezonul J/psi a fost curînd recunoscut ca fiind o formă de *charmoniu*, adică un mezon cu compoziția de quarkuri $c\bar{c}$.

Descoperirea charmoniului a stimulat căutarea unor alte quarkuri, mai grele. Existau rațiuni să se prevadă că ele există sub formă de perechi, și cele două quarkuri „desemnate" să apară, după cele patru cunoscute, au fost quarkurile b și t, amintite anterior.

Prima stare legată a quarkurilor $b\bar{b}$, numită *bottomiu* a fost descoperită în 1977; a primit numele de y-psilon și are o masă de 9,46 GeV/c^2. Dar starea legată a quarkurilor $t\bar{t}$, numită *toponiu* nu a fost încă detectată. Dacă toponiul există, se apreciază că masa sa va fi de circa 40 GeV/c^2.

Detectarea stărilor legate de quarkuri, adică a quarkoniului, se face în acceleratoarele de energii mari, prin anihilări de fascicule electron-pozitron. Studiul stărilor legate de quarkuri poate oferi informații prețioase asupra intensității forțelor de culoare la o diversitate de distanțe.

Experiențele făcute pînă acum cu charmoniul și bottomiul au permis măsurători ale forței de culoare variind între 10^{-15} m, care

este dimensiunea unui hadron obișnuit, pînă la $2 \cdot 10^{-16}$ m, o distanță de cinci ori mai mică. Din aceste măsurători au putut fi constituite grafice care să reprezinte variația intensității forței de culoare în funcție de distanțele dintre quarkuri.

Imposibilitatea izolării unui quark, discutată teoretic mai sus, a fost de altfel confirmată experimental, observînd coliziunile unor fascicule de electroni și pozitroni la energii foarte mari (32 GeV). Deoarece quarkurile, întocmai ca și gluonii, nu pot fi observate direct, evidența existenței lor trebuie să fie dedusă din observarea hadronilor cunoscuți, în acceleratoare. Electronii și pozitronii nu sînt hadroni, deci nu conțin quarkuri, dar atunci cînd se ciocnesc violent se anihilează reciproc, dînd naștere la o stare de pură energie, din care se pot materializa un quark și un antiquark, evident de culori complementare.

Rezultatul coliziunii se vede în înregistrări, sub forma a două jeturi de hadroni, cap la cap, în sensuri opuse. (Hadronii apar ca urmare a legăturii quarkului și antiquarkului, apăruți prin materializare, cu particule respectiv complementare, care apar în vecinătatea lor). Dacă energia interacției este suficient de mare, atunci există posibilitatea ca cel puțin una dintre particule să cedeze o parte din energia sa, emițînd un gluon. Dar emisia gluonului alterează geometria evenimentului observat. Aceasta deoarece, asemănător generării de hadroni, de quarkul și antiquarkul original al coliziunii, gluonul induce și el formarea de perechi quark-antiquark în spațiul din jur, astfel că, practic, el se dezintegrează în hadroni.

Clișeul înregistrării unui astfel de eveniment este spectaculos: pe lîngă cele două jeturi cap la cap, în sensuri opuse, care apar la coliziunile fără emitere de gluoni, la emiterea unui gluon apare un jet suplimentar (eveniment tri-jet), pornind (aproape) din același punct, cele trei jeturi formînd între ele unghiuri de circa 120°. Această distribuție de particule a fost numită de fizicieni (care s-au obișnuit să folosească nume năstrușnice) *eveniment Mercedes*, după emblema cunoscutei mărci de autovehicule cu același nume...

Gluboli sau *gluoniu*. În fizica particulelor elementare se admite că o particulă poate exercita o forță asupra unei alte particule doar prin intermediul unei a treia particule, care să asigure un proces de

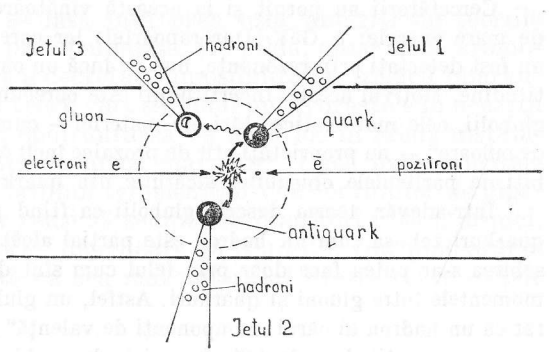


Fig. 34. Evenimentul „trijet" sau „Mercedes", care a pus în evidență existența gluonului. Toate procesele care au loc în cazul coliziunilor între electroni și pozitroni sînt instantanee și nu pot fi observate direct. Figura scoate în evidență libertatea asimptotică a quarkurilor (de la locul coliziunii pînă la generarea jeturilor de hadroni). Unul dintre cele două quarkuri cedează o parte din energia sa sub forma unui gluon, care produce cel de-al treilea jet de hadroni. Prezența jetului 3 constituie „semnătura" gluonului.

schimb. Care sînt însă proprietățile acestei de-a treia particule? Este ea doar pe post de intermediar al forței, sau, la rîndul ei, poate „simți" forțele și să se combine cu alte particule, formînd stări mai complexe?

Răspunsul a început să se concretizeze prin comunicările cercetătorilor K.I. Ishikawa și M. Chanovitz, care atestau că produsele de dezintegrare observate în cîteva experimente la energii înalte păreau să rezulte din „stări legate" ale particulelor care erau schimbate în interacțiile tari. Cum particulele purtătoare de forță în acest tip de interacții erau gluonii, stările lor ipotetic legate au fost numite *gluboli* (glueballs) sau *gluoniu*.

După cum se știe, gluonii sînt parțial asemănători fotonilor: au masa de repaus zero și se mișcă cu viteza luminii. Dar gluonii au și sarcini de culoare. Această diferență în natura gluonilor are consecințe importante. Astfel, deoarece fotonii sînt electric neutri, nu există forțe care ar putea să-i lege; în schimb gluonii, avînd sarcini de culoare, există posibilitatea ca doi gluoni să interacționeze unul cu altul, schimbînd un al treilea gluon.

În anumite condiții gluonii se pot lega între ei într-un asemenea mod încît ansamblul să devină incolor.

Cercetătorii au pornit și la această vînătoare, folosind instalații de mare energie: 3 GeV. Dar rapoartele lor care atestau că glubolii au fost detectați prin rezonanțe, mai au încă un oarecare grad de incertitudine. Motivul acestei incertitudini este oarecum ironic: se pare că glubolii, cele mai exotice stări ale materiei — cum ar fi acești „atomi de culoare" — au proprietăți atît de prozaice încît este greu să fie deosebiți de particulele obișnuite, alcătuite din quarkuri.

Într-adevăr, teoria descrie glubolii ca fiind parțial alcătuiți din quarkuri, tot așa cum un hadron este parțial alcătuit din gluoni. Deosebirea s-ar putea face doar prin felul cum sînt distribuite energia și momentele între gluoni și quarkuri. Astfel, un glubol poate fi considerat ca un hadron ai cărui „componenți de valență" sînt gluonii, în timp ce „componenții de valență" ai unui hadron obișnuit sînt quarkurile.

(Noțiunea de „componenți de valență" provine de la o analogie luată din chimie; quarkurile și gluonii de valență reprezintă influența determinantă a proprietăților unui hadron, la fel cum electronii determină proprietățile chimice ale unui atom.)

Imaginația teoreticienilor merge însă mai departe. Convinși că multe fenomene ale naturii prezintă periodicitate, au preconizat un sistem periodic al rezonanțelor descoperite în experimentele cu acceleratoarele de diferite energii; toate rezonanțele care *nu* au loc în tabel, ar putea foarte bine să fie gluboli!

Foarte interesante sînt experimentele referente făcute la Stanford, folosind coliziuni electron-pozitron, pentru a studia modul de dezintegrare a *charmoniului* (starea legată $c\bar{c}$). În procesul de dezintegrare, agregatul $c\bar{c}$ se anihilează și o parte a energiei apare sub formă de doi gluoni plus un foton. Mai frecvent, gluonii formează un jet de hadroni, dar este posibil ca doi gluoni să se lege sub formă de gluoniu sau glubol. Aceasta duce la o stare finală, constînd dintr-un glubol plus un foton. Experimentatorii au căutat o astfel de configurație și au descoperit un nou hadron, pe care l-au numit *i-ota* (ι), avînd masa de 1,44 GeV/c^2.

Particula i-ota se comportă ca cea așteptată de la un glubol și nu pare deloc să fie interpretabilă ca o stare conținînd quarkuri. Se crede foarte tare că această stare este, de fapt, primul glubol.

Descoperirea glubolilor, întocmai ca orice descoperire a unei noi particule, este un eveniment remarcabil în sine, dar pentru teoria cromodinamicii cuantice el capătă o semnificație aparte. Identificarea lor sigură va confirma natura relațiilor dintre sarcina asociată cu o interacție și particula care mediază interacția.

Fizicienii nu se lasă însă prea ușor amăgiți de teoriile frumoase, uneori prea frumoase. De pildă, chiar dacă cromodinamica cuantică a decretat imposibilitatea izolării quarkurilor libere, există teorii care sînt mai puțin drastice în această privință. Desigur, confruntarea va avea loc în arena instalațiilor cu puteri din ce în ce mai mari. Dacă experimentele cu acceleratori de ordinul teraelectron-volților (miilor de giga-electron-volți) vor reuși să semnaleze quarkuri libere, atunci, probabil, teoria forței de culoare va fi uitată. Dar pînă atunci ea este considerată ca cea mai puternică dintre toate forțele din Univers.

Structura quarkurilor?

Desigur, cu toate exploziile de entuziasm ale cercetătorilor, cu diversele prilejuri de descoperire a unei noi particule sau verificarea vreunei preziceri teoretice, situația nu era limpede. Lucrurile se complicau din ce în ce, începea o nouă avalanșă de evenimente și, pe bună dreptate, a apărut întrebarea: oare, nu cumva quarkurile sînt și ele combinații ale unor alte entități? Dacă lucrurile ar sta așa, atunci ar trebui găsită o altă imagine a ultimului „strat" al microcosmosului.

Teoreticienii au preluat ideea și, folosind imaginea dublă pe care o avea un quark — aroma și culoarea —, au „înjumătățit" quarkurile. Adică, fiecare quark ar fi format din două *prequarkuri* sau *preoni*, unul definind calitatea quarkurilor (aroma), iar celălalt coloarea asociată. În această schemă au fost aduși și leptonii, adoptîndu-se încă o culoare, de pildă violet.

În noua schemă, care a fost propusă de I. Pati și A. Salam, leptonii au devenit o categorie de quarkuri: electronul este un quark *d* violet, iar electronul greu (miuonul) este un quark *s* violet. Deci toate particulele ar putea fi formate din 8 preoni; calitatea quarkurilor ar fi definită de 4 preoni, iar ceilalți 4 preoni ar defini culoarea.

Noua schemă aducea însă și alte înlocuiri spectaculoase:

— quarkurile nu mai trebuiau să aibă sarcini electrice fracționare (ele puteau avea acum sarcini electrice asemenea celor ale electronului sau protonului);

— schema permite „apariția în public" a quarkurilor libere;

— faptul că electronii și quarkurile fac parte din aceeași familie implică posibilitatea dezintegrării quarkurilor (care au masa mai mare) în electroni.

În ultimii 10 ani, ideea că quarkurile și leptonii posedă o structură internă a stimulat pe mulți teoreticieni să formuleze noi modele. Au apărut astfel diverse denumiri pentru „subquarkuri"; în afară de prequarkuri și preoni, întîlniți în modelul Pati-Salam, au apărut nume ca: maoni, alfoni, quinksi, cromoni, flavoni, somoni și rishoni.

Nu trebuie să se creadă cumva că modelele puteau fi alcătuite la întîmplare. Era necesar să fie respectată cerința ca atît quarkurile, cît și leptonii trebuiau să aibă spinul egal cu 1/2. Pentru a menține această valoare a spinului existau două căi simple. Prima ține cont de faptul că un quark sau un lepton poate fi imaginat ca un ansamblu de două particule constituente, una cu spinul 0 sau 1, iar cealaltă cu spinul 1/2. Cea de-a doua cale consideră quarkurile și leptonii formați din trei particule, fiecare avînd spinul 1/2. Oricare din cele două căi răspund condiției ca rezultatele compunerii „subparticulelor" să aibă spinul 1/2.

În anul 1975, I. Pati, A. Salam și J. Strathdee au elaborat un interesant model bazat pe prequarkuri sau preoni. Noul model avea caracteristic faptul că cele trei subparticule individuale erau foarte simple. Motivul acestei simplități consta în aceea că fiecare constituent trebuia să aibă doar o singură proprietate definitorie a quarkurilor și leptonilor.

Generații de quarkuri și leptoni. Realitatea arată că întreaga materie din natură poate fi formată dintr-un număr redus de particule, care, potrivit modelului quarkurilor larg acceptat, include quarkurile *u* și *d*, electronul și neutrinul electronului. Aceste patru particule, precum și antiparticulele lor, formează așa-numita „generație I" a quarkurilor și leptonilor.

Restul de quarkuri și leptoni, pur și simplu repetă același tabel în două generații suplimentare, fără să aducă nimic nou. Particulele corespondente din diversele generații sînt identice din toate punctele de vedere, exceptînd doar masa.

Generația	Aroma leptonilor	Sarcina electrică	Masa [GeV/c²]	Aroma quarkurilor	Sarcina electrică	Masa [GeV/c²]
I	ν_e e	0 −1	$0{,}05 \cdot 10^{-6}$ $0{,}511 \cdot 10^{-3}$	*u* *d*	+2/3 −1/3	0,3 0,3
II	ν_μ μ	0 −1	$0{,}57 \cdot 10^{-3}$ 0,106	*c* *s*	+2/3 −1/3	1,5 1,5
III	ν_τ τ	0 −1	0,25 1,784	*t* *b*	+2/3 −1/3	19 4,7

Întrucît quarkurile nu pot fi izolate, masele lor pot fi găsite doar indirect. Masele lor efective depind de mijloacele prin care sînt determinate, în special pentru quarkurile ușoare. Astfel, masele quarkurilor constituente sînt deduse din masele hadronilor observați. În felul acesta au fost estimate masele quarkurilor *u* și *d*, de circa 0,3 GeV/c² (adică 1/3 din masa nucleonului).

În tabelul alăturat au fost trecute masele leptonilor și masele quarkurilor care constituie hadronii din cele trei generații. Neutrinii (deși ideea este încă controversată) se așteaptă să aibă mase considerabil mai mici decît ale leptonilor cu sarcină electrică. Un experiment făcut de cercetători sovietici a raportat o constatare a masei neutrinului electronului în limitele 14—46 eV/c².

Fără îndoială că existența a trei generații de quarkuri și leptoni ar cere o explicație. Oare de ce natura se repetă? Ce înseamnă aceste diferențe între masele particulelor? Oare există o constantă universală care să lege între ele masele particulelor? Deocamdată nu se știe...

O altă problemă obsedantă o constituie rezultanta sarcinilor electrice. Acestea au valori precise, în raporturi de 1/3 și 2/3, care determină, de pildă, sarcina +1 pentru proton. Dacă ar exista cît de mici diferențe, la aglomerări mari de atomi acestea s-ar pune în evidență prin deviații de la starea de neutralitate electrică pe care au dovedit-o un mare număr de experiențe. De ce, oare, natura a favorizat tocmai aceste rapoarte, de 1/3 și 2/3 între limitele +1 și −1? Există, oare relații între sarcina electrică a quarkurilor și culoarea lor, sau între quarkuri și leptoni? Deocamdată nu se știe...

După cum se va vedea în secțiunile următoare, se caută răspunsuri prin așa-numita teorie a unificării particulelor elementare și a forțelor fundamentale, care, însă, se pare că pentru a simplifica lucrurile trebuie să introducă forțe suplimentare...

Modelul Pati-Salam-Strathdee este construit pe baza observației că fiecare quark sau lepton poate fi identificat prin trei din proprietățile sale: sarcina electrică, culoare și număr de generație. Orice quark poate fi „asamblat" selectînd cîte un preon din fiecare familie. Pentru a „simplifica" relațiile cu modelul, preonii din cele trei familii au primit diverse nume. Astfel, preonii care determină rangul generației au fost numiți *somoni* (de la cuvîntul grecesc *soma* însemnînd *corp*), deoarece ei hotărăsc masa particulei compuse. Deoarece sînt trei generații de quarkuri și leptoni, trebuie să există trei somoni.

Culoarea particulei compuse este determinată de *cromoni*. Există 4 cromoni: roșu, galben, albastru și incolor. Ceilalți preoni, care definesc sarcina electrică, au fost numiți *flavoni* (de la cuvîntul englezesc *flavor*, însemnînd *aromă*, termen cu care au fost caracterizate proprietățile de calitate ce deosebesc quarkurile u, d, s, c, b și t). Familia flavonilor are doar doi membri.

Pentru a compune un quark sau un lepton este necesar să se ia cîte un preon din fiecare familie. De pildă, electronul se poate obține din somonul S_1, cromonul C_4 și flavonul f_2 etc., potrivit tabelului alăturat.

Preoni		Sarcina electrică	Culoare	Numărul generației
Flavoni	f_1	$+1/2$	incolor	0
	f_2	$-1/2$	incolor	0
Cromoni	C_1 (roșu)	$+1/6$	roșu	0
	C_2 (galben)	$+1/6$	galben	0
	C_3 (albastru)	$+1/6$	albastru	0
	C_4 (incolor)	$-1/2$	incolor	0
Somoni	S_1	0	incolor	1
	S_2	0	incolor	2
	S_3	0	incolor	3

Modelul are însă neajunsul că obligă ca fiecare compus să fie format din cîte un singur membru din fiecare familie. De ce nu ar exista și compuși care să fie alcătuiți, de pildă, din 3 cromoni, sau 2 somoni și un flavon? Sînt posibile sau nu astfel de combinații? Se cere un răspuns...

Un model interesant: rishonii

Poate cel mai simplu model al structurii quarkurilor și leptonilor a fost propus de H. Harari, în 1979. Modelul postulează doar două specii de particule componante, numite *rishoni* (de la ebraicul *rishon*, însemnînd *primul* sau *primar*). Astfel, există rishonii T (cu sarcina electrică $+1/3$) și rishonii V (fără sarcină electrică), precum și antirishonii $\overline{T}$ (cu sarcina electrică $-1/3$) și antirishonii $\overline{V}$ (fără sarcină electrică).

Regula de compunere a unui quark sau lepton este simplă: pot fi grupați oricare 3 rishoni pentru a forma un sistem compus, sau pot fi grupați oricare 3 antirishoni. Dar iată și un prim neajuns: ese interzis amestecul rishonilor cu antirishonii în aceeași combinație!

Cu ajutorul modelului rishonilor se pot obține 16 combinații, care vor reproduce exact proprietățile a 16 quarkuri, antiquarkuri, leptoni și antileptoni din generația I. (În aceste combinații, fiecare culoare este calculată separat.)

Combinațiile pot fi clasificate astfel: grupul TTT are sarcina $+1$ și corespunde pozitronului; similar $\overline{T}\overline{T}\overline{T}$ are sarcina -1 și corespunde electronului. Grupurile VVV și $\overline{V}\overline{V}\overline{V}$ sînt electric neutre și corespund neutrinului și antineutrinului.

Celelalte combinații revin quarkurilor, cu sarcini fracționare. Astfel, grupul TTV are sarcina $+2/3$, deci este un quark u de o anume culoare. Prin aranjamente (TVT, VTT) se pot obține încă două quarkuri u, de celelalte două culori. Iar grupul TVV are sarcina electrică $+1/3$, este un antiquark $\bar{d}$, de o anume culoare; prin aranjamente ale grupului TVV, (VTV, VVT) se obțin antiquarkurile $\bar{d}$ de celelalte două culori. Se poate deduce ușor că din grupurile $\overline{T}\overline{T}\overline{V}$ (cu sarcina $-2/3$) se obțin cele trei quarkuri d, iar din grupul

$\overline{T}\overline{V}\overline{V}$ (cu sarcina electrică —1/3) se obțin cele trei antiquarkuri $\bar{u}$.

Pentru deducerea culorii quarkului se consideră că rishonul T poate avea oricare din cele trei culori de bază, iar V are oricare din cele trei anticulori. La antirishoni, repartizarea culorilor și a anticulorilor se face invers.

Un alt mare neajuns al modelului rishonilor îl constituie faptul că nu poate explica decît particulele din generația I. Orice încercări de adaptare au fost sortite eșecului. Defecțiunea pare să fie fundamentală și fără remediu...

Cercetările continuă

În orice caz, deocamdată modelul Pati-Salam-Strathdee, cu trei entități fundamentale, este cel mai atrăgător. El a fost acceptat de fizicieni nu numai de dragul simetriei sale, ci și pentru că dădea un răspuns la o veche întrebare; de ce, dintre toate particulele grele din Univers, numai protonul are o „viață veșnică"? Răspunsul (care avea să declanșeze una dintre cele mai complicate vînători de particule) era: protonul nu are viață veșnică; el se descompune, într-un timp nelimitat, într-un antielectron și cîțiva neutrini. Dar asupra acestei pasionante probleme se va reveni în secțiunile următoare.

Cu toată simpatia de care se bucura, modelul Pati-Salam-Strathdee a avut și el „probleme". Descoperirea electronului supergreu (taonul), cea a particulelor y-psilon, precum și introducerea celor două noi „arome" de quarkuri, b și t, au modificat schema Pati-Salam-Strathdee, mărind la 10 numărul preonilor: 6 calități (arome) de quarkuri și 4 culori. Noua schemă este însă asimetrică și cum de atîtea ori natura a arătat că iubește simetria, n-ar fi exclus ca această schemă să indice existența a încă două culori. La ce ar mai folosi însă două culori în plus? Poate la explicarea unor noi particule supergrele, compuse din 4—5 quarkuri, care încă nu au fost identificate, deși experiențele le-au semnalat prezența.

Noua teorie asupra particulelor elementare a generat un domeniu special de cercetare, numit „fizica aglomerărilor de quarkuri". Dacă schema Pati-Salam-Strathdee este corectă, atunci va fi suficient să se determine numărul maxim de

quarkuri dintr-o aglomerare; acestui număr îi va corespunde un număr egal de culori, a căror sumă trebuie să dea culoarea albă. Dacă se adaugă și culoarea leptonilor, atunci se obține numărul maxim de culori pe care îl acceptă natura și, implicit, numărul maxim de calități pentru quarkuri.

Oricît de hazardată ar fi presupunerea de mai sus, pentru fizicieni este extrem de atractivă prin simetria sa, de atîtea ori cerută de legile obiective ale naturii.

Una din sarcinile fizicii contemporane și viitoare poate fi și aceea de a stabili limitele familiilor de entități de bază ale materiei. Pentru aceasta vor trebui perfecționate instalațiile de cercetare, în speță obținerea de energii din ce în ce mai mari și detectori extrem de sensibili.

Va exista o limită a numărului particulelor subnucleare care pot fi puse în evidență? Probabil că se va ajunge la un număr limită, atunci cînd timpul de viață al particulelor va ajunge aproape cît timpul de desfășurare a interacției care le generează. Pe de altă parte, în 1969, Heisenberg remarca: „putem diviza tot mai mult materia, dar nu vom ajunge la particule mai mici, deoarece noi vom crea permanent noi particule cu energia folosită". Adică, chiar dacă se vor folosi energii din ce în ce mai mari, de la o anumită valoare se vor crea doar perechi particulă-antiparticulă cunoscute.

Din punct de vedere teoretic, problema divizării la infinit a materiei poate trece acum din nou pe planul dezbaterilor filozofice, dar din punct de vedere al fizicii, Gell-Mann sugerează o altă alternativă: „Probabil va veni un tînăr fizician care va găsi un nou mod de a privi fizica fundamentală și va descoperi că răspunsurile la întrebările din fizica contemporană sînt ridicol de simple".

În cazul în care va putea fi elaborată o teorie consistentă a prequarkurilor, ea va trebui totuși să treacă dificilul obstacol al experimentului. În primul rînd va trebui să se stabilească în laborator dacă quarkurile și leptonii au într-adevăr o structură internă. Dacă se confirmă existența unor subquarkuri, experimentele vor trebui să facă deosebire între diversele modele. Apoi, experimentele vor trebui să asigure penetrarea mai adînc în zone încă necunoscute ale materiei, la

distanțe mai mici decît 10^{-18} m și la energii de ordinul tera-electron-volților.

Nu se pot aștepta rezultate mai degrabă de unul sau două decenii, cînd se estimează că nivelul următor al structurii materiei se va arăta mai clar cercetătorilor (dacă într-adevăr există un astfel de nivel!). Ar fi posibil ca modelele actuale să constituie un embrion al unei astfel de teorii a subquarkurilor, ori, poate, teoria corectă va apărea din ipoteze absolut noi.

Folosind cuvintele lui N. Bohr, s-ar putea spune că, poate, ideile prezentului „nu sînt suficient de trăznite pentru a fi corecte".

Capitolul 13

MAREA UNIFICARE A FORȚELOR FUNDAMENTALE ȘI A PARTICULELOR ELEMENTARE

Interacția tare

Una din cuceririle majore ale fizicii moderne din ultimele două decenii o constituie elaborarea unor noi clase de teorii care descriu forțele ce acționează între particulele subnucleare. Pînă la introducerea acestor teorii, exista părerea că în natură acționează patru forțe independente între ele: forța gravitațională, forța electromagnetică, forța tare nucleară și forța slabă nucleară.

În fizica clasică, prin care se reflectă în general rezultatul experienței directe cu fenomenele la nivelul macroscopic, forța poate fi definită, în sens larg, ca un „agent" ce poate modifica mișcarea unui corp, schimbîndu-i viteza sau direcția.

Newton, după ce, din 1665 a intuit existența forței gravitaționale, în anul 1687 a demonstrat că este o forță universală, adică aceeași forță explică atît greutatea corpurilor pe Pămînt, cît și atracția corpurilor cerești.

Alte două forțe fundamentale, bine cunoscute, identificate separat, sînt forța electrică și forța magnetică. Apoi, după ce H.C. Oersted și M. Faraday au arătat o interdependență între curentul electric și magnetism, J.C. Maxwell, printr-o intuiție genială, a elaborat, în 1861, teoria unificată a electromagnetismului. Prin lucrările sale, Maxwell a deschis o mare fereastră a fizicii, făcînd loc unei probleme care în zilele noastre este pe primele locuri în agendele de lucru ale fizicienilor.

Este vorba de posibilitatea unificării forțelor fundamentale. Teoria lui Maxwell, prin care a cuprins împreună forța magnetică și cea electrică, reprezintă prima *unificare a forțelor fundamentale*, demonstrînd prin aceasta că problema face parte din categoria celor rezolvabile.

În domeniul particulelor elementare însă, în care fizica clasică a fost înlocuită prin mecanica cuantică și teoria relativității, forța a primit un sens mult mai cuprinzător și a

fost caracterizată printr-o noțiune mai generală — interacția. O interacție poate produce schimburi de energie și de moment, care pot apărea între diferitele particule care se ciocnesc. De asemenea, o interacție poate afecta și o particulă aflată în repaus, în procesul de dezintegrare spontană.

Un succes al fizicii moderne l-a constituit reprezentarea forțelor fundamentale ca un schimb de *purtători de forță*, ce posedă proprietățile materiei care interacționează. Pe această idee, a purtătorilor de forță, H. Yukawa și A. Proca, în 1934 , prin cercetări independente, au explicat interacția dintre doi nucleoni printr-un schimb de mezoni. Aceste previziuni au fost ulterior confirmate, purtătorul de forță fiind *pionul*, în regim de particulă virtuală.

Interacția prin care două particule subnucleare schimbă între ele pioni virtuali a fost numită *interacție tare* nucleară.

Pionii și forța nucleară. Faptul că nucleele atomice sînt mici și că nucleonii trebuie să fie ținuți împreună de o forță tare, cu raza de acțiune mică, a fost cunoscută de timpuriu în istoria fizicii nucleare. Atunci o astfel de forță a fost fără precedent în natură, întrucît cele două forțe majore cunoscute — gravitația și electromagnetismul — aveau o dependență invers proporțională cu pătratul distanței dintre corpurile care interacționau. H. Yukawa a postulat, în anul 1930, că o astfel de forță poate fi „transportată" prin schimbul unei strîns legate particule cu masă finită. O particulă de masă zero dă o dependență invers proporțională cu pătratul distanței, în timp ce una cu masă finită dă o dependență exponențială. Din aprecierea razei de acțiune a forței, Yukawa a prezis masa aproximativă a particulei.

Această particulă a fost ulterior descoperită și a fost numită *mezon pi* sau *pion*. Dar în prezent este cunoscut faptul chiar că dacă schimbul de pioni este principalul component al forței nucleare, alți mezoni joacă de asemenea un rol important în interacțiile tari.

Forța nucleară tare rezultă din schimbul de *pioni virtuali*. Pe de altă parte, în sensul mecanicii cuantice, chiar protonii și neutroni liberi sînt înconjurați de un nor de pioni virtuali. În schimb, atunci, cînd într-un acceleartor protonii bombardează diverse ținte fixe, ei interacționează cu nucleele atomilor țintei, și, în proces, sînt generați *pioni reali*.

Pionii apar în trei forme diferite: pozitivi, negativi și neutri (din punct de vedere electric). Nici unul din ei nu este stabil, dar pionii cu sarcină electrică trăiesc suficient de mult (10^{-8} s) pentru a permite

fizicienilor să-i strîngă în fascicule și să le studieze proprietățile în interacțiile cu alte ținte.

În interacțiile pionilor cu protonii și neutronii au fost revelate multe evenimente, dar cel mai important îl constituie apariția *rezonanței delta*, care are un rol important în nucleu.

Procesele de interacție ale pionilor cu protonii și neutronii sînt asigurate prin acceleratoarele de energii relativ mici, care pot produce fascicule de protoni la energii de circa 500—800 MeV. În urma interacțiilor cu protonii și neutronii atomilor unei ținte, apar din abundență pioni; aceștia sînt colectați în fascicule de 10^7—10^8 pioni/s.

Pionii produși de aceste „fabrici de pioni" sînt de o energie la care interacțiile lor cu țintele nucleonice sînt dominate de rezonanțele delta. Un pion interacționînd cu un nucleon liber formează o rezonanță delta, care se dezintegrează rapid (10^{-23} s), prin reemiterea pionului. Dar dacă nucleonul este „închis" în materie nucleară, atunci de îndată ce pionul este emis, el se va recombina cu un alt nucleon pentru a forma o rezonanță delta.

Aceasta poate fi numită și *excitație delta* (sau, încă, *excitație delta-gol*, întrucît nucleonul care devine o rezonanță delta părăsește un *gol* nucleonic din „marea" de nucleoni). Dacă această excitație poate ajunge la suprafață, eventual se va dezintegra, reemițînd afară un pion. Oricum, chiar în materia nucleară sînt disponibile și alte opțiuni, în care excitația delta pierde energie și pionul dispare, într-un anume sens, pierzîndu-se singur în norul de pioni din jur și restituind energia, inclusiv masa de repaus, pentru a „încălzi" nucleul).

Procesul de absorbție nu se poate întîmpla cu un nucleon liber și înțelegerea acestui fenomen ar fi poate cea mai simplă cale disponibilă pentru cunoașterea rolului pionilor reali într-un nucleu.

Mecanismul interacției tari a fost o enigmă pînă în anul 1969, cînd M. Gell-Mann îi dă o explicație teoretică la nivelul quarkurilor, adică în spiritul cromodinamicii cuantice.

Potrivit modelului quarkurilor, interacția tare se reduce la un schimb dintre un quark u din una din particule, cu un quark d din cealaltă particulă. (Desigur, este vorba de interacția dintre doi nucleoni, care au în compoziția lor numai quarkuri u și d.) Schimbul s-ar realiza prin intermediul unui mezon virtual, de structură $d\bar{d}$, care se formează lîngă quarkul u. Perechea $d\bar{d}$ are o viață foarte scurtă, dar suficientă pentru a asigura schimbul dintre nucleoni.

Și în cazul forței electromagnetice, destul de bine cunoscută din experiența zilnică (scînteia bujiilor sau deviația

acului busolei), aspectul ei la un nivel subatomic ia o trăsătură neobișnuită. Potrivit teoriei cuantice relativiste, care stabilește o legătură între masă și energie, interacțiile electromagnetice sînt mediate de fotoni. Aceștia sînt „particule de schimb", cu masa de repaus zero și reprezintă cuante de energie.

Dar lumea quarkurilor nu este chiar atît de simplă. Pe lîngă calitățile pe care le au, sub numele comun de „aromă" și care au dus la stabilirea unui număr de șase tipuri de quarkuri, mai există și noțiunea de culoare. Potrivit acestei trăsături, după cum s-a arătat, există trei culori distincte (fundamentale); deci fiecare tip de quark, din cele șase, poate exista în trei exemplare, respectiv asociindu-le, pe rînd, cîte una din culorile fundamentale. Unele aspecte ale acestei trăsături a quarkului — culoarea — au fost prezentate în capitolul precedent. Esențial este faptul că forțele care acționează între quarkuri sînt asociate calității de culoare.

Forțele de culoare sînt responsabile și pentru combinațiile de quarkuri observate (indirect) în interacțiile înregistrate la acceleratoarele de mari energii.

Există și cîteva reguli, legate de forța de culoare, care specifică felul de combinații pe care le pot avea quarkurile. De pildă, hadronii nu prezintă sarcini de culoare; suma culorilor quarkurilor componente trebuie să fie incoloră. De aceea, singurele combinații permise sînt acelea dintre un quark și antiquarkul său (culori complementare) pentru a agrega un mezon; iar pentru a obține un barion sînt necesare trei quarkuri, avînd respectiv culorile fundamentale; roșu, galben și albastru. (Se știe că amestecul dintre o culoare și anticuloarea sa, precum și dintre cele trei culori fundamentale, dau culoarea albă, sau incoloră.)

Starea de culoare nu a fost niciodată observată izolat. Această constatare este consistentă cu faptul că nu au fost observate nici quarkuri libere, purtînd cîte o singură sarcină de culoare.

Activitatea forței tari dintre două quarkuri posedînd culoare trebuie să fie extraordinar de puternică, sau, mai corect spus, suficient de puternică pentru a confirma permanent quarkurile în acele agregate incolore care sînt hadronii.

Forța de culoare le-a rezervat însă fizicienilor o splendidă problemă paradoxală. Anume, în descrierea coliziunilor violente dintre pozitroni și electroni, atunci cînd, potrivit modelului quarkurilor apar jeturi de hadroni (din quarkuri, așa cum s-a arătat în capitolul precedent), quarkurile respective se aflau la o anumită distanță de la locul coliziunii, *deci s-au mișcat liber!* Această aparentă libertate a quarkurilor, la distanțe extrem de scurte, a fost numită de fizicieni *libertate asimptotică*. Or, această stare de lucruri este paradoxală; quarkurile interacționează doar slab atunci cînd sînt împreună într-un hadron și totuși nu pot fi separate. Dacă ar fi să se folosească o analogie simplă, hadronii ar putea fi considerați ca un mic balon în care sînt îngrădite quarkurile. În interiorul balonului quarkurile se pot mișca liber, dar nu pot scăpa afară. Desigur, povestea cu balonul este doar o metaforă prin care poate fi ilustrată comportarea forței între quarkuri, dar mai este așteptată o explicație asupra confinării quarkurilor în hadroni.

După cum s-a arătat anterior, cercetătorii au stabilit o relație care permite o evaluare cantitativă a forței de culoare. Potrivit relației, forța este o sumă din doi termeni: unul este variabil, invers proporțional cu pătratul distanței, iar celălalt reprezintă o forță constantă, evaluată la 16 tf! Relația nu a fost pe deplin verificată și desigur este legată de serioase cercetări suplimentare.

Forța tare nucleară acționează pe o rază de circa 10^{-15} m, care este aproape diametrul unui proton (numită și distanța de 1 fermi) și ține confinați toți componenții nucleului. Este de departe cea mai puternică forță din natură, de 1 000 de ori mai mare decît forța electromagnetică; intensitatea ei stă și la baza enormei energii de legătură a reacției termonucleare. Acționează asupra tuturor hadronilor, dar în alt context, cum s-a arătat anterior, se presupune că leagă și quarkurile, constituenții hadronilor.

Forța gravitațională și forța electromagnetică

Forța gravitațională nu a fost studiată la scara la care există particulele subnucleare. Efectele ei asupra infinitezimalelor mase ale particulelor sînt atît de mici încît pot fi ignorate. Ea este, prin contrast, cea mai slabă dintre cele patru forțe fundamentale cunoscute, însă totuși este cea mai

pătrunzătoare, acționînd atît asupra particulelor de substanță, cît și a cîmpurilor, pe distanță infinită. Intensitatea forței gravitaționale este extraordinar de mică față de cea a forței tari nucleare, adică avînd ordinul de mărime de 10^{-43} (desigur, încă un număr ce nu poate fi cuprins în reprezentările umane obișnuite!).

Ca urmare, forța gravitațională nu poate fi perceptibilă decît în apropierea unor mase materiale foarte mari, de pildă planetele. Se preconizează că are un purtător de forță de masă zero (ca fotonul), dar cu spinul 2, care a fost numit *graviton*.

În prezent sînt în curs, la Universitatea din Princeton (S.U.A.), experimente pentru înregistrarea schimburilor la distanță produse de undele gravitaționale (asociate gravitonului), cu o aparatură extrem de sensibilă de interferometrie laser, capabilă să înregistreze „ondulațiuni gravitaționale" de ordinul $1/10^{21}$! Cercetările se fac în cadrul așa-numitei astronomii a undelor gravitaționale, prin care se urmărește deschiderea unei noi ferestre spre Univers; în caz de reușită, rezultatele vor fi mult mai surprinzătoare decît cele oferite de radioastronomie, în 1950.

Raza de interacțiune a forței electromagnetice este, de asemenea, infinită, dar ea afectează doar particulele care posedă sarcină electrică. În afară de binecunoscutele sale efecte electrice și magnetice, ea determină dimensiunile și forma atomului și astfel „modelează" activitatea chimică.

Forța slabă

Dar cea mai enigmatică dintre toate este forța slabă nucleară, care are intensitatea de 100 000 de ori mai mică decît cea a forței tari. Ea este cea care guvernează dezintegrarea beta, oferind transmutația unei particule în alta, precum și o categorie de energie în stele. Acționează atît asupra hadronilor, cît și a leptonilor.

Dar cine este purtătorul forței slabe? Deși, cu ani în urmă, această ipotetică particulă nu a fost încă văzută, nici direct, nici indirect în vreun laborator, i s-a dat totuși un nume — *boson vector*, sau particula W (de la cuvîntul englezesc *weak*, însemnînd *slab*).

Numele este justificat de unele considerații tehnice, care arată că spinul unei astfel de particule ar trebui să fie 1. Or particulele al căror spin este un număr întreg (0, 1, 2) au fost numite *bosoni* (după numele fizicianului indian S.N. Bose, care, împreună cu A. Einstein, a investigat teoretic cîteva din proprietățile particulelor cu spinul întreg). În plus, particulele cu spinul 1 au fost numite *bosoni vector* (cuvîntul *vector* semnifică spinul 1), iar pentru particulele virtuale, purtătoare de forță, cum este considerată și particula W, a fost adoptat numele de *boson vector intermediar* (cuvîntul *intermediar* este folosit pentru a-i scoate în evidență rolul de mediator între particule).

În cazul forței electromagnetice, *bosonul vector intermediar* este fotonul, funcționînd ca cuantă de energie a cîmpului electromagnetic. Ca urmare a studierii sale, fizicienii au construit o teorie remarcabilă și cuprinzătoare numită *electrodinamica cuantică*, referitoare la cîmpul forței electromagnetice.

Pentru a ilustra (teoretic) rolul pe care l-ar avea particula W în procesul de dezintegrare beta, a fost imaginată schema următoare: neutronul emite spontan o particulă W încărcată electric negativ (W^-), transformîndu-se în proton. Apoi, particula W^- se dezintegrează într-un electron și un antineutrin $\bar{\nu}_e$. Această schemă, prin care interacția slabă este mediată de o particulă virtuală, așază procesul de dezintegrare beta pe același nivel conceptual cu interacțiile tari și cele electromagnetice.

Forța slabă are o rază de acțiune mult mai mică decît cea a forței tari, de 10^{-18} m. Dată fiind raza mică de acțiune, era de așteptat ca bosonul vector intermediar W să aibă o masă mai mare decît pionul, purtătorul forței tari.

Primele încercări experimentale de a detecta purtătorul forței slabe au fost infructuoase, deoarece masele lor mari nu erau compatibile cu puterea acceleratoarelor existente. Teoria însă a reușit să-și formuleze unele puncte de vedere, sub rezerva confirmării ulterioare, prin experimente.

Pentru a explica mecanismul forței slabe, teoria face apel la noțiunea de spin. Particulele cu spinul 1/2 — din care fac parte electronii, protonii, neutronii, miuonii, neutrinii și cîțiva hiperoni — au unele proprietăți speciale, datorate orientării vectorului asociat spinului. Anume, spinul 1/2 înseamnă că el poate avea două sensuri, pe direcția paralelă

cu axa de rotație a particulei. După felul cum sînt orientați spinii, există două tipuri de particule: de dreapta (cu rotirea spre dreapta) și de stînga (cu rotire spre stînga). Particulele sînt „de dreapta" atunci cînd sensul vectorului spinului coincide cu sensul de mișcare a particulei, iar „de stînga" atunci cînd cele două sensuri sînt contrare.

Electromagnetismul și forța tare nucleară nu țin cont de orientarea particulelor, dar în cazul forței slabe orientarea lor prezintă o importanță deosebită.

Mai trebuie făcută o precizare: o particulă care are masa de repaus diferită de zero poate să-și schimbe orientarea, pe cînd particulei cu masa de repaus zero îi este interzisă o astfel de... comportare.

În cazul forței slabe trebuie să se facă deosebire între orientările particulelor, deoarece ele se comportă diferit, punînd în evidență, sau nu, o *sarcină specifică* (sarcina slabă), pe lîngă sarcina electrică.

Dar este ce *sarcina slabă?* Similar celorlalte forțe, și forței slabe îi este asociată o sarcină specifică (ce poate fi definită cu ajutorul unei constante de cuplaj adimensionale). Orientarea particulei are o influență hotărîtoare asupra sarcinii slabe: *numai particulele orientate spre dreapta și antiparticulele orientate spre stînga* posedă sarcină slabă. Iar particulele orientate spre stînga și antiparticulele orientate spre dreapta sînt neutre din punct de vedere al forței slabe și nu participă la interacții slabe.

De aici rezultă concluzii nebănuite. De exemplu, din cauză că sarcinile slabe ale electronilor „de dreapta" și „de stînga" sînt diferite, *sarcina slabă nu poate să se conserve!* Este ceea ce se numește „violarea parității".

Teoriile de etalonare și unificarea electroslabă

În anul 1967, S. Weinberg, S. Glashow și A. Salam, lucrînd independent, au formulat o teorie care s-a dovedit a fi una dintre cele mai senzaționale contribuții în fizica particulelor elementare din ultimul timp. Este vorba de ideea *teoriilor de etalonare (gauge* în limba engleză — cit. gheidj). Potrivit noii teorii, este prevăzută existența unui al treilea tip de boson vector intermediar al forței slabe, numit Z^0,

care este electric neutru. După cum se va vedea, aceste considerații vor avea consecințe nebănuite.

În limbajul fizicienilor, procesul de dezintegrare beta, în care intervine bosonul W^-, se spune că este mediat de un *curent de sarcină electrică*, sau *curent încărcat.* În procesul de respingere a doi electroni intervine, ca particulă de schimb, fotonul. Acest tip de interacție se spune că este mediat prin *curent electromagnetic.* Prin analogie, este imaginat un proces slab în care intervine bosonul Z^0, în care interacția este considerată că s-a realizat prin *curent neutru.*

(Pentru ultimul tip de interacții, deoarece pare mai deosebit, se poate anticipa că procesele de curenți neutri au fost

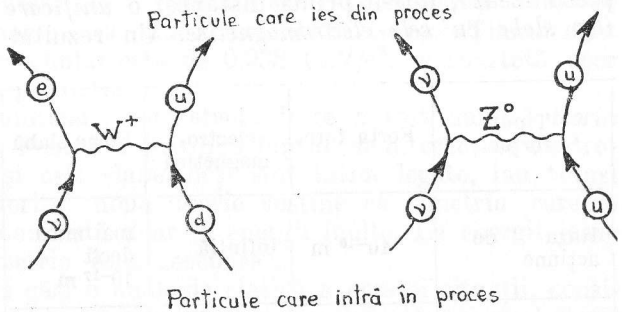


Fig. 35. Reprezentarea prin diagrame Feynman a interacțiilor slabe ale leptonilor și quarkurilor: proces de curent cu sarcină (stînga) și proces de curent neutru (dreapta).

descoperite experimental în 1973, iar studiile ulterioare asupra lor au arătat că ele se supun precis predicțiilor teoriei. Este vorba de împrăștierea elastică a unui neutrin pe un proton, o interacție slabă în care nu intervine un schimb de sarcini electrice. Pe cînd în cazul proceselor de curenți încărcați, acestea reprezintă împrăștierea inelastică a miuonilor pe electroni, în care intervin schimburi de sarcină electrică.)

Interacțiile prin cele trei tipuri de curenți, prezentate mai sus, scot în evidență posibilitatea de a stabili unele conexiuni între forța electromagnetică și forța slabă. Ideea avea ca suport faptul că purtătorii forței slabe prezintă sarcini electrice, iar această proprietate îndemna la o sinteză a celor două f orțe.

De altfel, fizicienii nu iubesc deloc ideea că există diferitele tipuri de interacții, guvernate de seturi diferite de reguli. Ei preferă să-și imagineze că undeva, la un nivel mai profund, toate aceste interacții sînt, de fapt, aspecte ale unui proces unic, iar diferențele care apar se datoresc detaliilor interacțiilor și nu unor deosebiri fundamentale.

În tabelul alăturat este prezentată o sistematizare a celor patru forțe fundamentale. Diferențele remarcabile dintre ele păreau mult mai descurajante celor care căutau să găsească unitatea Cosmosului, decît confuzia pe care o crea abundența particulelor elementare.

Revenind la *teoriile de etalonare* menționate, acestea preconizează, într-o primă instanță, o *unificare a interacțiilor slabe cu cele electromagnetice*. Un rezultat imediat al

Tipul forței	Forța tare	Forța electromagnetică	Forța slabă	Forța gravitațională
Raza de acțiune	10^{-15} m	infintiă	mai mică decît 10^{-17} m	infinită
Intensitatea relativă	1	10^{-3}	10^{-5}	10^{-43}
Particulele asupra cărora acționează	Hadroni	Toate particulele care posedă sarcină electrică	Hadroni și leptoni	Toate particulele
Purtătorul de forță (Particula de schimb)	Gluon	Foton	Bosoni W± și Z^0	Graviton (?)
Masa de repaus	0	0	83—94 GeV/c^2	0(?)
Spin	1	1	1	2(?)

acestei idei, că cele două interacții sînt doar manifestări diferite ale unui singur fenomen de bază, a fost estimarea masei bosonului W. Unificarea propusă implica faptul că la distanțe foarte mici, și deci la energii foarte înalte, forța slabă este comparabilă cu forța electromagnetică. Aparenta sa „slăbiciune" în experimentele făcute la energii mici reflectă numai zona sa mică de acțiune. De aceea, diferența esențială dintre intensitățile aparente ale celor două interacții trebuie să fie datorată doar masei bosonului W. Pe aceste considerente, masa bosonului W a fost estimată ca fiind de circa 100 de ori mai mare decît a protonului.

(De asemenea, anticipînd desfășurarea evenimentelor, masa bosonului W± determinată experimental este de 83 GeV/c^2, iar a bosonului Z^0 este de 94 GeV/c^2. Ținînd cont că masa protonului este de 0,938 GeV/c^2, se constată ușor exactitatea predicției.)

Teoria unificării celor două forțe a fost numită *teoria electroslabă*. Pentru a justifica faptul că interacțiile electromagnetice și cele slabe, deși sînt intim legate, iau totuși aspecte diferite, noua teorie susține că simetria care le unește se manifestă doar la energii înalte. La energii joase această simetrie este „ascunsă".

Se poate găsi o analogie clasică a acestei situații, considerînd comportarea magnetică a fierului. Atunci cînd fierul este încălzit, moleculele sale — privite ca niște magneți infinitezimali (dipoli) — sînt în mișcare termică dezordonată și deci orientate haotic. Privită macroscopic, comportarea magnetică a fierului este aceeași în toate direcțiile, reflectînd *simetria* rotațională a legilor electromagnetismului. Dacă însă fierul este răcit sub o temperatură critică, dipolii săi se vor alinia după o direcție arbitrară, lăsînd metalul magnetizat pe o direcție axială. Acum *simetria* este „ascunsă".

Principalul agent vinovat de „ruperea simetriei" care unește electromagnetismul cu intersecțiile slabe la energii mari este preconizat a fi o particulă numită *boson Higgs* (sau Higgs-on), introdus de Peter Higgs, în anul 1964. O teorie de etalonare a interacțiilor particulelor fundamentale de masă zero arată că efectul bosonilor Higgs este de a „genera masă" bosonilor slabi, precum și quarkurilor și leptonilor printr-un mecanism de „rupere spontană de simetrie".

Bosonul Higgs este astfel socotit responsabil pentru faptul că quarkurile și leptonii din cadrul aceleiași familii au mase

diferite. Se crede că la energii foarte înalte toate quarkurile şi toţi leptonii au masa zero; la energii mai joase, interacţiile cu bosonii Higgs ar conferi quarkurilor şi leptonilor diferitele lor mase.

Teoria prezice în sens larg masa bosonilor Higgs (între 10—1000 GeV/c^2!), iar interacţiile sale sînt specificate complet. Astfel, se presupune că el „preferă" să cupleze particule grele, ca W, Z şi quarkul t.

Bosonul Higgs este o particulă presupusă de spin zero. Din nefericire el rămîne elusiv, datorită slabei sale cuplări cu quarkurile uşoare şi cu leptonii, precum şi, poate, fiindcă masa sa este mult mai mare decît a bosonilor vector intermediari. De aceea, probabil că vor fi necesare eforturi experimentale uriaşe, respectiv energii mult mai mari decît cele ale acceleratoarelor prezentului, pentru a-l detecta.

Ruperea spontană de simetrie. Elaborarea teoriilor cu ruperi spontane de simetrie au rezolvat oarecum dificultăţile privind masele bosonilor slabi, izbitor de mari (83—94 GeV!). Ce înseamnă o rupere de simetrie? Un exemplu mecanic al acestui proces poate fi ilustrat prin îndoirea unei bare subţiri de metal (de pildă, un ac de tricotat), aşezată vertical, sub acţiunea unei forţe de comprimare pe direcţia axială. Chiar dacă bara este simetrică faţă de axă şi perfect omogenă ca material, se poate selecta o direcţie particulară ca să se îndoaie sub acţiunea unei forţe suficient de mari.

Direcţia îndoirii este, evident, arbitrară şi pe baza principiilor fizicii îndoirea putea să se producă de-a lungul oricăror direcţii. Remarcabil este faptul că simetria originală *nu* este pierdută în „ruperea spontană de simetrie", ci devine doar ascunsă.

Bosonii Higgs, particule de spin zero, au fost preconizaţi ca un mijloc de a produce ruperi spontane de simetrie în teoriile de etalonare. Aşa-numitul mecanism Higgs, folosind bosonii de spin zero, a constituit o soluţie salvatoare prin care se explică generarea maselor bosonilor slabi, fără a distruge simetria de etalonare locală.

Vorbind despre mecanismul Higgs, într-un limbaj plastic se poate spune că bosonii vector intermediari, lipsiţi de masă, „mănîncă" bosoni Higgs pentru a-şi achiziţiona mase. Particula (scalară) care rămîne în urma procesului, notată cu H^0, ar fi bosonul Higgs observabil.

O descoperire spectaculoasă: bosonii vector intermediari

Particulele W şi Z au fost descoperite experimental în 1983. Întrucît teoria electroslabă le prezicea mase foarte mari, experimentele de căutare a bosonilor vector intermediari au cerut coliziuni frontale de particule elementare la cea mai înaltă energie disponibilă. Astfel de energii, capabile să producă bosoni W şi Z au fost realizate cu coliziuni de fascicule încrucişate proton-antiproton $(p\bar{p})$ în laboratorul CERN din Geneva.

Cum au fost descoperiţi bosonii W şi Z? Pentru a realiza uriaşele energii necesare acestui scop a fost necesară conversia sincrotronului superproton (SPS) existent (care are circumferinţa de 6 km!) într-o instalaţie pentru ciocniri de fascicule încrucişate $p\bar{p}$ (collider). Antiprotonii au fost creaţi prin coliziunea unui fascicul intens de protoni cu o ţintă staţionară. Apoi antiprotonii, care erau produşi avînd momente diferite, au fost injectaţi într-un inel de stocare. În inel, momentele diferite ale antiprotonilor au fost îngustate, folosind o tehnică nouă numită *răcire stocastică*. Apoi, nori denşi de antiprotoni au fost injectaţi în SPS, împreună cu protonii care circulau în sens opus. După injectarea în SPS, protonii şi antiprotonii au fost accelerati împreună la o energie de 270 GeV fiecare. Fasciculele au fost stocate timp de cîteva ore la această energie, perioadă în care aveau loc coliziuni $p\bar{p}$ atunci cînd fasciculele se intersectau (fascicule încrucişate), în locuri special create. În instalaţie s-au realizat ciocniri frontale de 540 GeV pe fiecare coliziune $p\bar{p}$, energii care erau de circa 10 ori mai mari decît cele obţinute cu oricare alt accelerator.

Pentru a avea o confruntare a rezultatelor, au fost organizate două zone de observaţii (UA1 şi UA2).

Bosonii vector intermediari şi-au lăsat semnături foarte distincte în detectoarele echipei UA1. Particula W (care se prezintă cu două sarcini electrice diferite, W^+ şi W^-) a fost identificată prin dezintegrarea sa într-un pozitron şi un neutrin sau într-un electron şi un antineutrin. Traiectoria electronului a fost măsurată prin urmele de ionizare pe care le-a lăsat în detectorul central. Energia electronului a fost măsurată cu ajutorul calorimetrelor. Cu neutrinul problema

a fost mai complicată, întrucît neavînd sarcină electrică nu lasă urme directe în detector. Oricum, există evidențe certe pentru prezența neutrinului în evenimentele produse de bosonul W. Aceste evidențe vin de la o aparentă pierdere a conservării momentului, asemănător cu dezintegrarea $n \rightarrow pe\bar{\nu}$. (De fapt, din studiul acestei dezintegrări a neutronului s-a ajuns la ipoteza existenței neutrinului.)

Datele au fost înregistrate în noiembrie și decembrie 1982, din circa 10^9 (!) interacții $p\bar{p}$. După o atentă analiză a datelor obținute, grupul UA1 a găsit... 6 evenimente cu un electron sau un pozitron de foarte mari momente transversale

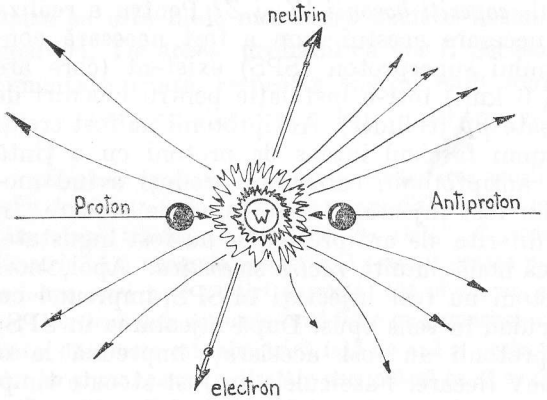


Fig. 36. Detectarea bosonului vector intermediar W. Un proton, deplasîndu-se cu o viteză apropiată de cea a luminii, colizionează frontal cu un antiproton avînd aceeași viteză, în interiorul camerei de detecție a acceleratorului. O mare parte din energia de coliziune este convertită ca masă, generînd particula W. În mai puțin de 10^{-24}s, particula W se dezintegrează în două particule de viață mai lungă, care pot fi identificate de detectoare: un electron de mare viteză și un fantomatic neutrin. Acestea constituie „semnătura" particulei W. Alte particule mici, sub formă de debriuri, însoțesc coliziunea, pe traiectoriile menționate pe figură.

(momente perpendiculare pe axa fasciculelor ce colizionau), împreună cu un *mare moment transversal lipsă*. Grupul UA1 nu a putut găsi altă explicație pentru aceste evenimente decît că reprezintă producerea a noi particule masive, W^+ și W^-, care se dezintegrează într-un electron (sau pozitron) și neutrin (sau antineutrin).

Timpul de dezintegrare a bosonului W este de 10^{-24} s.

Descoperirea a fost anunțată în ianuarie 1983, de C. Rubbia. Grupul UA2 a confirmat rezultatele obținute.

Descoperirea bosonului Z^0. O altă rundă de cercetări prin coliziuni $p\bar{p}$ a fost făcută la același SPS din Geneva. De data aceasta performanțele instalației au fost îmbunătățite spre a obține 10^{10} coliziuni $p\bar{p}$.

Cu acest prilej, pentru prima dată au fost observate evenimente ce conțineau electroni și pozitroni la mari energii. Au fost identificate patru astfel de evenimente, de perechi electron-pozitron. Toate cele patru evenimente aveau în comun valoarea masei de circa 95 GeV/c^2. Au mai fost detectate perechi de miuon-antimiuon, de asemenea cu o masă de 95 GeV/c^2.

Aceste date reprezintă evenimente clare pentru existența unei noi particule, care se dezintegrează în perechi electron-pozitron și miuon-antimiuon. Singura interpretare cunoscută a acestei particule este că reprezintă bosonul vector intermediar neutru Z^0.

Descoperirea lui Z^0 a fost comunicată de grupul de cercetare UA1 în mai 1983, cu confirmarea ulterioară a grupului UA2.

Cercetătorii admit că mecanismul de producere a bosonilor vector intermediari prin coliziuni $p\bar{p}$ se poate explica prin anihilări de perechi quark-antiquark, care fac parte respectiv din protonul și antiprotonul din coliziune. Cît despre modurile de dezintegrare ale lui W și Z, acestea sînt bine prezise și ele constituie semnăturile celor doi bosoni: $W^+ \rightarrow e\bar{\nu}$, $W^- \rightarrow e\bar{\nu}$, $Z^0 \rightarrow e\bar{e}$ și $Z^0 \rightarrow \mu\bar{\mu}$. Oricum, aceste dezintegrări în leptoni se așteaptă să fie doar un mic procent din tabloul de dezintegrări W și Z. Mai este nevoie de multă muncă experimentală în anii următori, pentru a găsi și alte scheme de dezintegrare ale acestor bosoni.

Fizicienii sînt foarte entuziasmați de descoperirea bosonilor vector intermediari, întrucît aceștia au confirmat previziunile teoriei electroslabe, deschizînd drum optimist altor unificări ale forțelor fundamentale.

Descoperirea bosonilor vector intermediari a fost un triumf colectiv: al artei acceleratoarelor, al tehnicii experi-

mentale și al gîndirii teoretice. Aceste evenimente au dat un impuls cercetătorilor de a continua activitatea lor de investigare a materiei la profunzimi din ce în ce mai mari. Pentru aceasta însă obiectivul prioritar ar fi obținerea de energii din ce în ce mai mari. Dar, după cum s-a arătat la capitolul despre acceleratoare, această cursă va fi limitată la puteri de cîțiva teraelectron-volți (1 TeV=10^3 GeV) din cauza uriașelor costuri ale instalațiilor (la tehnica prezentului!).

Astfel de energii uriașe sînt cerute în speranța de a putea studia mai sistematic quarkurile. Dar refuzul „încăpățînat" al quarkurilor de a se arăta în public în mod direct, asociată cu ideea de confinare a acestora sugerează că probabil nici dacă se va dispune de energii uriașe, nu se vor putea observa vreodată quarkurile în stare de izolare. Aceasta înseamnă că fizicienii vor fi siliți să studieze în continuare quarkurile prin intermediul celorlalte particule subnucleare, și aceasta este o muncă extrem de dificilă.

Drumul spre „Marea unificare"

Dar deși lucrurile ar părea că stau pe loc pe frontul cuceririi quarkurilor, în fața fizicienilor s-a deschis o nouă zonă de cercetare — cea care vizează unificarea forțelor fundamentale și a particulelor elementare.

Visul de aur al fizicii este clar din acest punct de vedere: se caută unificarea celor patru forțe fundamentale sub o singură „cupolă", o singură teorie, pe care au numit-o „teoria unificată a forțelor fundamentale și a particulelor elementare sau „Marea unificare a forțelor fundamentale și a particulelor elementare (GUT — de la exprimarea în l. engleză: Grand Unified Theory).

Dacă la început, timp de mai mulți ani, părea un proiect îndepărtat, existînd doar unificarea realizată de Maxwell (1861), începînd din anul 1967, teoria unificată electroslabă precum și modelul cromodinamicii cuantice au dat un nou impuls problemei. Mai ales că cele mai multe observații arătau că fenomenele puteau fi acum explicate prin două teorii, ale interacțiilor tari și ale interacțiilor electroslabe. Unele dintre aceste observații par să invite la unificarea în continuare a interacțiilor tare, slabă și electromagnetică (forța gravitațională a fost lăsată pentru... mai tîrziu).

Printre sugestiile care invită la o mai mare aprofundare a modelului de unificare se numără și izbitoarea asemănare dintre quarkuri și leptoni. Particulele din ambele grupuri nu prezintă o structură internă la nivelul de rezoluție al experimentelor prezentului. Quarkul posedă sarcină de culoare, în timp ce leptonii nu au o astfel de calitate; în schimb, ambele tipuri de particule au spinul 1/2 și iau parte la interacțiile slabe și electromagnetice. În plus, chiar teoria electroslabă sugerează o relație între quarkuri și leptoni. Dar pînă cînd fiecare din cele trei familii de leptoni (de pildă, electronul și neutrinul său) nu pot fi corelate cu familiile corespunzătoare de quarkuri (de pildă, quarkurile *u* și *d*, în cele trei culori), teoria electroslabă va fi încurcată în inconsistențe matematice.

Dar din cîte se cunosc despre forțele fundamentale, o serie de proprietăți par totuși consistente cu procesul de unificare. De pildă, toate cele trei forțe pot fi descrise prin teorii de etalonare, care au structuri matematice similare. Mai mult încă, intensitățile celor trei forțe au o pronunțată tendință să conveargă pentru distanțe foarte mici, fenomen care se manifestă însă numai la energii foarte mari.

Privind însă cu un ochi critic, cele constatate pînă acum despre forțele fundamentale nu par să sprijine ideea unificării. Adică, se știe că intensitatea forței electromagnetice crește puternic la distanțe mici, pe cînd intensitatea forței tari sau de culoare, la distanțe mici devine extrem de slabă Oare, este posibil, cu asemenea mari diferențe, ca aceste interacții să devină comparabile la energii foarte mari? Un răspuns încearcă să-l dea teoriile de etalonare.

Teoria de etalonare este un concept matematic care leagă transformările geometrice în spațiu și timp, simetria legilor naturii precum și simetriile interne care definesc proprietățile cuantice ale materiei. Există o diferență esențială între simetriile obișnuite, geometrice și simetriile de etalonare, acestea din urmă fiind dotate cu o putere extraordinară. Încercînd să explice această „putere", S. Weinberg arăta: „O simetrie obișnuită organizează particulele în familii, dar nu spune ce fel de particule există. O simetrie de etalonare însă spune nu numai felul cum se comportă particulele existente, ci totodată stabilește existența familiilor specifice de particule, numite *particule de etalonare*".

Teoria de etalonare nu poate fi explicată fără a se face apel la o ramură a matematicii numită *teoria grupurilor*, care a devenit extrem de familiară celor care se ocupă de fizica particulelor subnucleare. Poate, totuşi, cîteva exemple „mai familiare" vor aduce oarecare clarificări. De pildă, a fost acceptată ideea că forţa de legătură nucleară se datoreşte unor schimburi de pioni între nucleoni. Dar există trei feluri de pioni: pozitivi, negativi şi neutri; toţi participă la aceste schimburi între nucleoni. Cu toate acestea, atunci cînd se vorbeşte de asocierea pionilor cu forţa tare, nu se face deosebire fundamentală între cele trei tipuri, cu toate că în detalii ei diferă unul de celălalt în orientare, izospin şi sarcină electrică. Astfel, forţele asociate pionului neutru sînt considerate identice cu cele ale celorlalţi pioni (neglijîndu-se micile detalii).

Într-o aceeaşi manieră, teoriile de etalonare privesc forţele asociate schimburilor de fotoni (forţa electromagnetică) ca fiind identice cu cele asociate bosonilor W şi Z (forţa slabă).

Ideea teoriilor de etalonare este mai veche. Încă din anul 1918, H. Weyl a propus unificarea gravitaţiei cu electromagnetismul. Teoria sa se baza pe ipoteza că descrierea unei forţe nu este alterată de nici o modificare a scalei de lungime a riglelor sau de scara timpului ceasornicelor ce sînt folosite ca instrumente de măsură în diverse locuri în spaţiu-timp. El a numit această proprietate ca invarianţă de etalonare după numele de etalon (calibru) sau instrumentele de măsură la care se referea Weyl.

O astfel de teorie este numită *teorie de calibrare* sau *de etalonare*.

Teoria lui Weyl nu a dat o explicaţie corectă a gravitaţiei şi a fost în general abandonată. Fără îndoială însă, principiul invarianţei de etalonare a devenit un pivot al teoriilor moderne ale particulelor elementare.

În anul 1954, C.N. Yang şi R. Mills au elaborat o clasă de teorii de etalonare cunoscute sub numele de *teorii de etalonare nonabeliene*. (În matematică, grupul nonabelian este un grup care nu are proprietatea de comutativitate.) Teoriile fac o generalizare importantă a teoriei lui Maxwell, a electromagnetismului, iar teoria matematică a grupurilor a primit un rol principal.

Steven Weinberg

Într-o teorie a grupurilor se studiază operaţiile ca, de pildă, rotaţiile şi reflexiile în oglindă ale unui corp solid care lasă obiectul aparent neschimbat. Astfel, aspectul unei sfere nu este schimbat prin nici o rotaţie rigidă în jurul centrului său, iar grupul care exprimă matematic această simetrie este numit *SU(2)*.

Mulţi teoreticieni au studiat teoriile de etalonare nonabeliene. În 1967, un grup de fizicieni format din S. Weinberg, A. Salam, J.C. Ward, P. Higgs şi alţii au arătat că o teorie de etalonare nonabeliană poate unifica forţa electromagnetică cu forţa slabă.

Pentru a putea da o imagine asupra felului cum lucrează o teorie de etalonare, ar putea fi considerat un exemplu mai concret din viaţă. Presupunem că într-un coş se află amestecate mere şi portocale, în număr egal. Apoi, să mai presupunem că în coş vom înlocui fiecare măr cu o portocală şi fiecare portocală cu un măr. După efectuarea acestei operaţii, am putea pune întrebarea, dacă prin operaţia făcută s-a schimbat vreo proprietate a coşului. Sau, mai precis, am putea pune întrebarea: ce fel de restricţii ar trebui impuse pe fiecare măr sau portocală, astfel încît proprietăţile coşului să fie aceleaşi atît înainte, cît şi după operaţia de înlocuire.

De pildă, s-ar putea cere ca greutatea coşului să rămînă neschimbată. O analiză simplă va convinge că o dată ce fiecare măr a fost înlocuit cu o portocală şi viceversa, condiţia ca greutatea coşului să rămînă aceeaşi va fi întotdeauna îndeplinită, indiferent de greutăţile relative ale celor două feluri de fructe. În termeni mai pretenţioşi s-ar spune că „greutatea totală este un invariant în condiţiile respective".

Un alt exemplu al acestui tip de invarianţă apare în interacţiile tari, în care caz se spune că interacţia este la fel dacă se substituie neutronii cu protoni şi viceversa. Aceasta este ceea ce se numeşte *invarianţa spinului izotopic* în interacţiile tari.

Dar asupra coşului cu mere şi portocale se poate pune şi o condiţie mai riguroasă. Anume, se poate cere ca greutatea coşului să rămînă neschimbată dacă luînd fiecare fruct din coş hotărîm, la întîmplare, care să fie măr şi care portocală. Întrucît de data aceasta fiecare fruct, din întregul coş, este rezultatul unei selecţii arbitrare, greutatea totală va rămîne neschimbată numai dacă merele şi portocalele au fiecare aceeaşi greutate. În acest caz, condiţia ca greutatea totală a coşului să fie un invariant este echivalentă cu condiţia ca greutăţile individuale să fie egale. Deci, o invarianţă mai riguroasă decît în cazul precedent.

Analogul hadronic al acestor schimburi arbitrare ar fi să se pretindă ca o teorie să prezică aceleaşi valori pentru cantităţile măsurabile, dacă schimbăm arbitrar protonii cu neutronii, în fiecare punct al spaţiului. Teoriile care îndeplinesc aceste condiţii relativ stricte se spune că sînt invariante la transformările de etalonare şi sînt numite teorii de etalonare.

Teoriile de etalonare sînt atractive pentru fizicieni din mai multe puncte de vedere. În primul rînd ele pot reduce numărul interacţiilor fundamentale. Apoi, ele înlătură dificultăţile teoriei interacţiilor slabe, care erau incomplete deoarece nu au inclus efectul bosonului neutru Z^0 (este vorba de teoria electroslabă, care este o teorie de etalonare). Tehnic vorbind, specialiştii spun că teoria de etalonare a renormalizat interacţiile slabe. În fine, teoriile de etalonare au prezis că trebuie să existe reacţii de *curenţi neutri*, fapt care a fost confirmat experimental.

Cîteva predicţii ale teoriei de etalonare elaborată în 1967 de grupul de fizicieni amintit mai sus, care a fost numită *teorie electroslabă*, au fost confirmate în anul 1970. Dar cea mai spectaculoasă evidenţă a fost găsită în 1983, cînd au fost identificaţi experimental bosonii vector intermediari W^+, W^- şi Z^0, avînd exact masele prezise de teoria electroslabă.

Simetriile de etalonare şi cromodinamica cuantică

Consistenţa matematică a propunerilor de organizare a materiei pe baza teoriilor de etalonare este impresionantă. Pentru a face o evaluare a acestei colaborări este utilă o urmărire sistematică a evenimentelor.

Teoria unificată a electromagnetismului, elaborată de Maxwell s-a dovedit a fi cea mai veche teorie de etalonare. Ea spune că „trebuie să existe o particulă specială; această particulă este fotonul". Folosind notaţiile din teoria grupurilor, electromagnetismul este o simetrie notată *U(1)*. Numărul 1 se referă la faptul că fotonul interacţionează cu o singură particulă, o dată. Fotonul nu transformă niciodată o particulă în altă particulă.

Grupul *U(1)* este al transformărilor care pot fi efectuate cu un singur obiect, sau o matrice 1×1. Aplicată la electromagnetism, simetria *U(1)* înseamnă că forţa electromagnetică nu poate schimba identitatea particulei. Matricea 1×1 este ocupată de foton, care poate doar să transforme un electron în alt electron, eveniment ce poate fi ilustrat în figura alăturată.

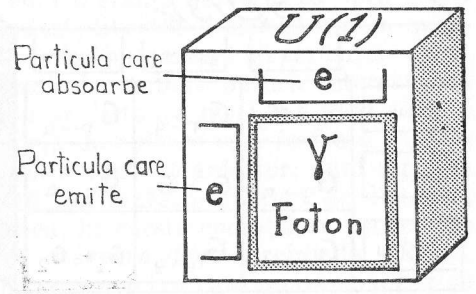


Fig. 37. Simetria U(1).

A urmat acceptarea teoriei quarkurilor de lumea științei, apoi completarea ei prin adăugarea calității de culoare, ajungînd să fie sistematizată sub denumirea de *cromodinamica cuantică*. Cu ajutorul aceste teorii s-a făcut ordine în sutele de particule elementare, reducîndu-le la trei familii fundamentale de quarkuri și leptoni, astfel:

	Quarkuri		*Leptoni*	
Sarcina	−1/3	+2/3	−1	0
Familia I	*d*	*u*	*e*	ν_e
Familia	*s*	*c*	μ	ν_μ
Familia III	*b*	*t*	τ	ν_τ

Cromodinamica cuantică este o teorie de etalonare de simetrie $SU(3)_c$. (Partea „cromo" arată că forțele nu acționează între sarcini electrice, ci între „sarcini de culoare".) Aici numărul 3 se referă la cele trei culori care sînt transformate una în alta de gluoni. Litera S indică faptul că suma sarcinilor de culoare în fiecare familie $SU(3)_c$ este zero (sau, în termeni de culoare, suma este albă sau incoloră), iar indicele c este pentru culoare.

Simetria $SU(3)_c$, care descrie forța tare nucleară, poate fi reprezentată printr-o matrice 3×3, arătînd cuplajul între gluoni și quarkuri, ca în figura alăturată.

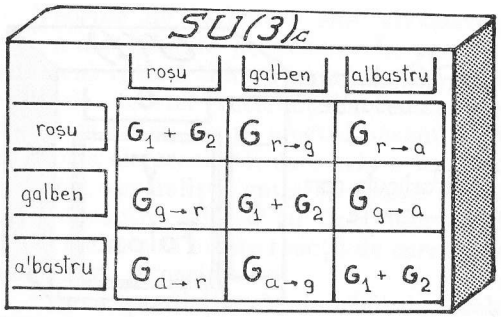


Fig. 38. Simetria $SU(3)_c$.

Oricare quark din culorile notate în stînga matricei poate fi transformat într-un quark din oricare din culorile notate deasupra matricii. Transformarea este mediată de gluonul specificat la intersecția dintre coloane și rîndul respectiv. De pildă, un quark cu roșu poate emite un gluon $G_{r\to a}$ pentru a deveni un quark cu albastru. Doi gluoni $(G_1 + G_2)$ nu alterează culoarea, ci (asemănător acțiunii fotonului la interacția electromagnetică) transformă culoarea în ea însăși. Se poate observa că cele trei transformări identice constituie diagonala matricei.

Se pare că gluonii care nu alterează culoarea, asigurînd transformarea identică, nu poartă culoare. În această organizare sînt necesari numai doi gluoni, neutri din punct de vedere al culorii, notați cu G_1 și G_2. Astfel, cu cele trei culori inițiale posibile și cu cele trei culori finale, prin care se asigură transformările de culoare, se pare că ar fi nevoie de 9 feluri de gluoni. Dar avînd în vedere cele trei transformări identice și necesarul de doi gluoni neutri, rezultă că există în total un număr de 8 gluoni care asigură forța de culoare.

Forța de culoare, care, de fapt, include forța tare nucleară, este oarecum deconcertantă. Întrucît gluonul are masa de repaus zero, ar fi de așteptat ca, întocmai fotonului, să aibă o rază de acțiune infinită care să scadă în intensitate cu pătratul distanței. Dar faptul că gluonii posedă și sarcină de culoare alterează caracterul forței. Anume, constanta de cuplaj a forței de culoare în loc să crească o dată cu micșorarea distanței (cum se petrec lucrurile în cazul forței electromagnetice), ea descrește cu cît distanța de interacție se micșorează. (Sau, cum se mai spune, quarkurile sînt asimptotic libere, deoarece constanta de cuplaj a forței de culoare tinde spre zero atunci cînd distanța tinde și ea spre zero.)

După cum s-a mai arătat, libertatea asimptotică a quarkului a fost confirmată prin numeroase experiențe.

Cercetătorii mai au încă de stabilit natura interacțiunii tari între quarkuri aflate la distanțe mari. Se pare că aici este valabilă legea, că forța de culoare este formată dintr-o sumă de doi termeni, cum s-a arătat anterior, unul din termeni reprezentînd o forță constantă, indiferent de distanță, evaluată la 16 tf. De aceea, în aceste condiții ar fi necesare energii nelimitate pentru a separa două sarcini de culoare, ceea ce explică de altfel cauza pentru care quarkurile par să fie „încorsetate" permanent în hadroni.

Între grupul de simetrie $U(1)$ al electrodinamicii cuantice și grupul de simetrie $SU(3)_c$ al cromodinamicii cuantice poate fi observată o analogie apropiată: grupul $U(1)$ descrie o teorie care este asociată conservării sarcinii electrice și cu masa de repaus zero pentru purtătorul de forță (fotonul), iar grupul $SU(3)_c$ descrie o teorie care este asociată cu conservarea sarcinii de culoare și cu masa de repaus zero pentru purtătorul de forță (gluonul).

Simetria $SU(3)_c$ este o simetrie exactă a naturii; ea nu este niciodată violată!

Simetria forței slabe

Forța slabă ține cont de spinii particulelor și de sensul de mișcare — de stînga și de dreapta. Astfel, particulele de schimb interacționează numai cu membrii dubleților de leptoni și quarkuri care sînt „de stînga" (adică au spinul antiparalel cu momentul lor). De pildă, cei mai ușori dubleți de leptoni și quarkuri sînt cei din familia I: e, υ_e și u, d. Acest tip de interacții este necesar pentru a explica asimetriile stînga-dreapta (violarea parității)observată în dezintegrările beta.

Teoria de etalonare care descrie forța slabă nucleară are simetria de grup $SU(2)$, în care cei doi componenți ai unui dublet pot fi transformați unul în altul. De exemplu, neutrinul electronului de stînga și electronul de stînga formează un singur dublet; lor li se asociază sarcinile slabe de $+ 1/2$, respectiv $- 1/2$. Al doilea dublet este format din quarkul u de stînga și quarkul d de stînga (sau trei dubleți, dacă fiecare culoare este luată separat); și ei, de asemenea, au sarcini slabe de $+ 1/2$, respectiv $- 1/2$. Antiparticulele corespunzătoare, de dreapta, formează ceilalți dubleți, avînd sarcinile slabe opuse dubleților de stînga. Mai rămîn 6 particule: $\bar{e}$, $\bar{u}$ și $\bar{d}$ de stînga și e, u și d dreapta, care nu formează dubleți (rămîn izolați, ca singleți) și au sarcina slabă zero (antineutrinul electronului are numai componentă de dreapta, *o singularitate care intrigă*, dar care poate avea un rol important în unele analize de evenimente materie-antimaterie!).

Simetriei $SU(2)$ îi sînt asociate trei particule care intermediază transformările dintre membrii fiecărui dublet (fig. 39) preconizate (la timpul respectiv) astfel: W^+, avînd atît o sarcină slabă, cît și o sarcină electrică, egale cu $+ 1$; W^-, avînd atît o sarcină slabă, cît și o sarcină electrică, egale cu $- 1$, precum și W^0, care este neutră atît din punctul de vedere al forței slabe, cît și electromagnetice.

Particula intermediară W^0, asemănătoare fotonului și grupului gluonilor $G_1 + G_2$, a fost preconizată ca purtătoare de forță între particule, dar care nu alterează nici una din calitățile particulelor aflate în interacție.

Pe de altă parte, W^+ și W^- sînt preconizate că transformă calitățile particulelor. De pildă, un electron „de stînga" ar putea emite o particulă W^- și astfel să se transforme într-un neutrin (tip electron) „de stînga"; în proces, sarcina electrică, din $- 1$ devine zero, iar sarcina slabă, de la $- 1/2$ devine $+ 1/2$.

Cel mai familiar proces de interacție slabă nucleară este dezintegrarea beta, în care un neutron (de quarkuri *udd*) emite un electron și un antineutrin și se transformă într-un proton (de quarkuri *uud*). Mai corect spus, evenimentul începe atunci cînd un quark d emite un boson W^- virtual și devine un quark u; apoi bosonul W^- se dezintegrează producînd un electron și un antineutrin.

Simetria electroslabă

Toate considerațiile făcute în jurul celor trei forțe fundamentale ale naturii au pus la îndemîna cercetărilor atît de multe date și relații încît realizarea teoriei unificate a particulelor elementare și a forțelor fundamentale promitea să solicite o imensă muncă de sistematizare. Însă, în aglomerarea de evenimente se puteau observa cîteva obsedante relații între forța slabă nucleară și electromagnetism.

În primul rînd, purtătorii forței slabe nucleare, W, posedă atît sarcină slabă nucleară, cît și sarcină electrică, în aceeași măsură. Apoi, în structura atît a dubleților, cît și a singleților există o relație curioasă între sarcina slabă și sarcina electrică: sarcina electrică a unei particule este invariabil egală cu suma dintre sarcina slabă a particulei și media sarcinii electrice a singletului sau dubletului din care particula face parte...

Făcînd aceste considerații, H. Georgi a notat sarcina electrică medie cu $U(1)$. Ca și altor sarcini, sarcinii $U(1)$ i se poate asocia o simetrie.

Fiind extrasă din interacțiile slabe, simetriei $U(1)$ i se poate asocia o particulă, care a fost notată cu V^0. Întocmai ca W^0 și fotonul, V^0 nu are nici un fel de sarcină: nici slabă, nici electrică. De aceea, el poate interacționa cu quarkuri și leptoni de ambele orientări (stînga-dreapta), cu o intensitate de cuplaj proporțională cu un număr cuantic cunoscut ca *suprasarcina slabă*.

Dar, întrucît există o relație între toate cele trei sarcini: slabă, $U(1)$ și electrică, este evident că între cele trei particule purtătoare de forțe trebuie să existe o relație. Se poate deci deduce că W^0 și V^0 nu pot fi observate în natură ca particule pure, ci doar sub formă de combinații între ele. O astfel de combinație dintre W^0 și V^0 este fotonul; iar o altă combinație posibilă a fost identificată ca o particulă ce a fost notată Z^0. Atît fotonul, cît și Z^0 mediază interacții în care particulele sînt transformate identic, potrivit previziunilor teoretice.

Diferența dintre foton și Z^0 consistă în faptul că primul intervine doar între particule care posedă sarcini electrice, pe cînd Z^0 leagă particulele care au sarcini slabe, inclusiv neutrinii.

Astfel, un complex de lucrări teoretice a dus la cea de-a doua „unificare". Derivînd fotonul și particulele W și Z din aceeași teorie, forța slabă nucleară și cea electromagnetică sînt parțial unificate. Teoria combinată este notată ca produs al grupurilor componente $SU(2) \times U(1)$, și a fost numită *simetrie electroslabă*.

În tabelul alăturat este ilustrată această unificare parțială.

După cum s-a mai menționat, sarcina slabă nu se conservă. În plus, ea are o foarte mică rază de acțiune, de circa

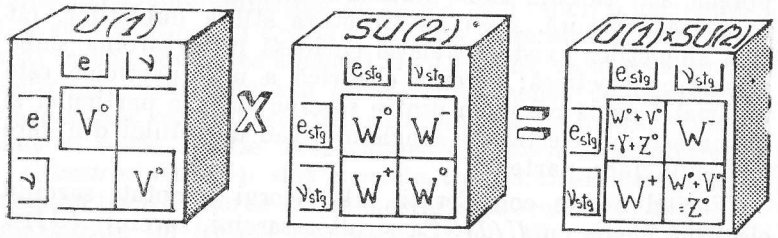


Fig. 39. Simetria U(1) × SU(2).

10^{-7} m. Cauza se atribuie faptului că W^+, W^- și Z^0 au mase mari.

Deci, masele mari ale bosonilor vector intermediari, prezise de teorie în 1967 și confirmate experimental în 1983 (masa $W^\pm$ este de 83 GeV/c^2 și masa Z^0 este de 94 GeV/c^2, de circa 100 de ori masa unui proton), sînt responsabile de „slăbiciunea" forței slabe la energii joase, comparativ cu forța electromagnetică. Bosonii W și Z achiziționează masele lor prin acele ruperi spontane de simetrie amintite anterior, produse de un cîmp scalar. Particula asociată, de spin zero, cunoscută ca *bosonul Higgs*, are un cuplaj foarte slab față de quarkuri și leptoni, care este proporțional cu masele lor.

Deși lipsesc date experimentale, a fost acceptată prezicerea teoretică pentru masa bosonului Higgs ca fiind cuprinsă între 10 GeV și 1 TeV, adică de ordinul de mărime al bosonilor vector intermediari $W^\pm$ și Z^0.

Nici simetria $SU(2) \times U(1)$ nu se conservă, din cauza mediului în care operează forța slabă. Fizicienii au găsit suportul teoretic care explică aceste „ruperi de simetrie" ale combinației unificate $SU(2) \times U(1)$, în care sînt luate în considerare distanțele la care acționează forțele, relația dintre distanță și energie.

Teoria $SU(2) \times U(1)$ este doar o unificare parțială, deoarece include doar două forțe distincte, fiecare cu simetria sa de grup și cu constanta sa de cuplaj. Pentru cercetători era clar faptul că o teorie unificată a forțelor slabă, tare și electromagnetică nu poate fi realizată prin renunțarea la modelele $SU(3)_c$ și $SU(2) \times U(1)$. Cele două modele au dat rezultate foarte bune pentru a se renunța la ele, în special după succesul obținut prin descoperirea experimentală a bosonilor vector intermediari $W^\pm$ și Z^0. Era evident că ceea ce ar putea duce la o teorie unificată trebuie să fie o suprastructură în care să fie incluse teoriile $SU(3)_c$ și $SU(2) \times U(1)$. Noua structură trebuie să aibă o simetrie mai mare, în care quarkurile și leptonii să se afle în relații strînse. Iar dacă interacțiile fundamentale sînt aceleași, atunci diferența dintre quarkuri, care răspund la forța tare, și leptoni, care nu răspund la forța tare, ar trebui să dispară.

Simetria standard a „marii unificări"

În unul dintre cele mai simple exemple ale unei teorii de mare unificare, elaborată de S. Glashow şi H. Georgi, în anul 1974, fiecare set corespunzător de quarkuri şi leptoni poate genera o familie cuprinzătoare, conţinînd toate stările diferite de sarcină sau spin ale fiecărei particule. Mai mult chiar, regularităţile din schemă cer ca sarcinile electrice să fie „porţionate" între particulele elementare, în multipli exacţi de 1/3, fiind în felul acesta responsabile de neutralitatea electrică a materiei stabile.

Atomul este neutru doar pentru că atunci cînd quarkurile sînt grupate cîte trei, aşa cum se petrec lucrurile cu protonii din nucleu, sarcinile lor individuale se combină pentru a da o sarcină care este exact un număr întreg, egală şi de sens opus unui număr întreg de electroni. Dacă quarkurile nu ar fi în relaţii strînse cu leptonii, potrivirea exactă a sarcinilor lor electrice nu ar fi decît o coincidenţă, ce e drept, remarcabilă...

Pentru o astfel de „mare unificare" este necesară doar o singură teorie de etalonare, care să fie consistentă cu toate interacţiile materiei. Tot ca cerinţă de principiu a teoriei de etalonare, fiecare particulă dintr-un set trebuie să se poată transforma în orice altă particulă. De acum sînt familiare transformările quarkurilor în alte quarkuri şi a leptonilor în alţi leptoni. O teorie a marii unificări sugerează că quarkurile se pot transforma în leptoni şi viceversa.

Un grup cuprinzător, care să includă toate cerinţele amintite mai sus, a fost propus de S. Glashow şi H. Georgi, în anul 1973, sub numele de simetria *SU(5)*. În grupul *SU(5)* sînt posibile transformări între 5 obiecte distincte, sau se spune că are o matrice 5×5. Este cel mai mic grup care poate cuprinde simetriile $SU(3)_c$ şi $SU(2) \times U(1)$.

În organizarea simetriei *SU(5)* se regăsesc cele două simetrii anterioare: $SU(3)_c$ şi $SU(2) \times U(1)$, ca subgrupuri, după cum se poate vedea în figura alăturată. Astfel, simetria $SU(3)_c$, a forţei tari, apare în matricea $3 \boxtimes 3$ din stînga sus, simetria *SU(2)*, a forţei slabe, apare în matricea $2 \boxtimes 2$, în colţul din dreapta jos, iar simetria *U(1)* asociată cu Z^0 apare combinată cu fotonul purtător γ de-a lungul diagonalei.

Teoria *SU(5)* postulează 12 noi particule intermediare (particule de etalonare) notate cu *X*, numiţi *bosoni leptoquark*, cu o masă preconizată de 10^{15}GeV/c², care pot să medieze transformări de la quark la lepton şi viceversa.

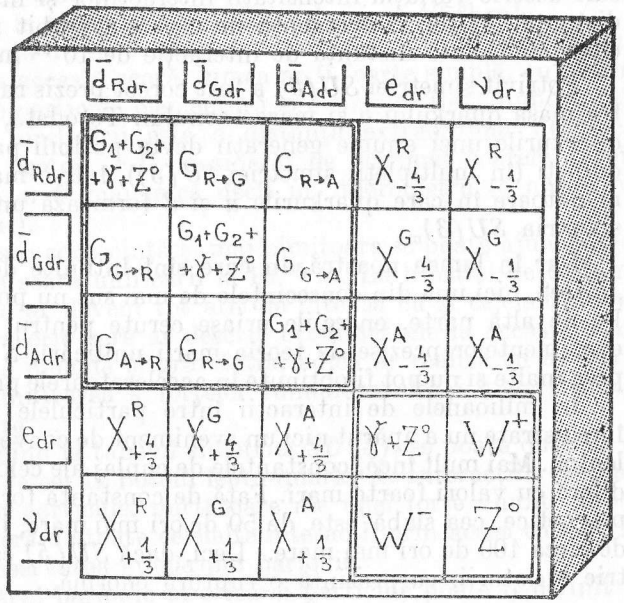


Fig. 40. Simetria SU(5).

În tabel se poate observa că este explicată şi cuantificarea sarcinilor electrice: toate sînt multipli de 1/3.

Cea mai semnificativă realizare a unificării *SU(5)* o constituie faptul că a cuprins leptonii şi quarkurile. În această simetrie ei fac parte din aceeaşi familie, un quark putînd fi transformat în lepton şi invers la fel de simplu cum se fac conversiile quark-quark sau lepton-lepton.

O altă consecinţă a unificării *SU(5)* este faptul că cele trei forţe incluse (tare, slabă şi electromagnetică) trebuie să aibă aceeaşi intensitate sau aceeaşi constantă de cuplaj.

Cuplajele simetriilor de etalonare depind de scara energiei interacţiilor la care sînt măsurate. La energii mari, cuplajele simetriilor $S(3)_c$, *SU(2)* şi *U(1)* sînt total diferite, dar

ele depind de scara maselor în interacţii şi toate converg spre o valoare comună în jurul energiei de 10^{12} TeV, valoare care pare să fie necesară pentru realizarea marii unificări. Dar asemănător altor teorii de etalonare, teoria marii unificări descrie variaţia intensităţii interacţiilor şi în funcţie de distanţă. Astfel, convergenţa de care s-a vorbit mai sus ar corespunde la o distanţă de interacţie de 10^{-31} m.

Potrivit simetriei *SU(5)* a fost corect prezis raportul dintre masa quarkului *b* şi masa taonului. Totodată, leptonii şi quarkurile unei anume generaţii devin posibili parteneri de dubleţi (în multipleţii simetriei *SU(5)*), într-o manieră asemănătoare în care quarkurile *u* şi *d* formează un dublet în simetria $SU(3)_c$.

Dar în lumea noastră, în care sînt întîlnite doar energii „joase", nici una din consecinţele de mai sus nu pot avea loc. Pe de altă parte, energiile uriaşe cerute pentru observarea evenimentelor prezise de teoria marii unificări, *SU(5)*, sînt prea înalte şi nu pot fi obţinute în acceleratoarele prezentului..

În milioanele de interacţii între particulele elementare înregistrate nu a apărut nici un eveniment de conversie quark-lepton. Mai mult încă, constantele de cuplaj ale celor trei forţe diferă cu valori foarte mari. Faţă de constanta forţei electromagnetice, cea slabă este de 50 de ori mai mare, iar cea tare de circa 100 de ori mai mare. Deci, dacă *SU(5)* este o simetrie a naturii, ea prezintă o ruptură enormă...

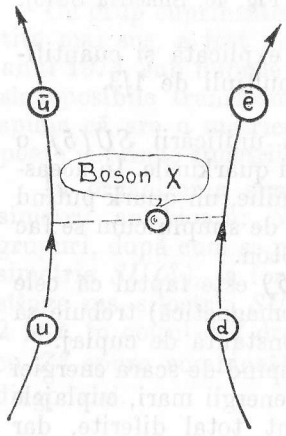


Fig. 41. Schimbul unui boson lepto-quark *X* produce tranziţia quarkului *d* în pozitron şi a quarkului *u* în antiquarkul *ū*.

Ruperea simetriei s-ar putea datora bosonilor lepto-quark, cărora li s-a asociat o masă mare (10^{15} GeV/c^2), intrînd astfel în categoria particulelor supergrele. Simetria s-ar pune în evidenţă doar la energii foarte înalte (10^{12} TeV) şi la distanţe mult mai mici decît în cazul simetriei $SU(2) \times U(1)$ (evaluată la circa 10^{-18} m), adică la circa 10^{-31} m!

Distanţa de 10^{-31} m este considerată ca fiind *scara de unificare*. La această scară, lumea ar fi foarte simplă, cu un singur fel de particulă elementară şi o singură forţă importantă.

Scara unificării este o distanţă extraordinar de mică. Dacă un proton ar fi considerat de mărimea soarelui, scara unificării ar fi mai mică decît un micrometru (o milionime de metru!).

Dar la o consecinţă şi mai uimitoare se poate ajunge dacă se reduce scara unificării la 10^{-35} m. La o astfel de distanţă gravitaţia ar deveni tot atît de intensă ca şi celelalte forţe; astfel, o teorie care ar descrie evenimentele la această scară trebuie să includă şi gravitaţia, adică ar realiza cu adevărat „marea unificarea a forţelor fundamentale şi a particulelor elementare"...

Revenind la tabelul simetriei *SU(5)*, se poate observa că el cuprinde cei 12 bosoni lepto-quark, *X*. Interacţiile mediate de aceste particule, purtătoare ale unei forţe numite *super-slabe*, diferă de toate celelalte interacţii prin aceea că ele violează conservarea numărului barionic.

Numărul barionic al oricărei particule poate fi definit ca 1/3 din numărul quarkurilor minus 1/3 din numărul antiquarkurilor. Deci protonul şi toate particulele care conţin trei quarkuri au numărul barionic + 1, în timp ce mezonul şi alte particule care constă dintr-un quark şi un antiquark au numărul barionic zero.

În interacţiile tari, slabe şi electromagnetice, suma algebrică a numerelor barionice se conservă. Dacă această conservare a numărului barionic este o lege a naturii, atunci protonul nu se va dezintegra niciodată, el fiind cea mai „uşoară" particulă cu numărul barionic nenul!

Dar iată surprinza adusă de teoria *SU(5)*. Unificarea stabilită prin această teorie, care prevede că transformările pot trece graniţa dintre quarkuri şi leptoni, implică faptul că *protonul*, care este un agregat de quarkuri, *se dezintegrează!* Dacă protonul se dezintegrează, atunci se poate trage concluzia că aserţiunea că numărul barionic este o constantă în

Univers, nu este o lege a naturii! Această lege, probabil că a fost călcată cîndva, într-o epocă a istoriei Universului, dacă o astfel de asimetrie a apărut în Universul timpuriu....

Protonul: particulă instabilă?

Teoreticienii au luat în serios această predicție a „catastrofei" protonului și au găsit o schemă de desfășurare posibilă a evenimentului. Se știe că un proton conține quarkurile *uud*, fiecare quark fiind de altă culoare. Dacă s-ar întîmpla ca două quarkuri să se apropie la o distanță mai mică de 10^{-31} m, între ele poate trece o particulă X — bosonul lepto-quark. De pildă, un quark, d, roșu, de dreapta poate emite o particulă X cu o sarcină electrică de $-4/3$ și o sarcină de culoare roșie (vezi tabelul simetriei $SU(5)$). Quarkul d pierzîndu-și astfel sarcina de culoare și schimbîndu-și sarcina electrică de la $-1/3$ la $+1$ se va transforma într-un pozitron. Între timp, particula X poate fi absorbită de un quark u galben, de stînga, care se va transforma într-un antiquark $\bar{u}$, antialbastru, de stînga. Noul antiquark $\bar{u}$ se va combina cu quarkul rămas u, formînd un pion neutru. Numerele barionice ale pozitronului și ale pionului rămași din proton sînt zero, astfel că din numărul barionic $+1$ al protonului s-a ajuns la zero!

Dar procesul nu se oprește aici. Pozitronul poate ușor întîlni un electron și prin anihilare generează doi fotoni de mare energie (fotoni gama). Pe de altă parte, quarkul u și antiquarkul $\bar{u}$, care formează pionul, se pot anihila și ei, generînd, de asemenea, fotoni. Astfel, rezultatul final este că atomul de hidrogen (care are ca nucleu un proton) se dezintegrează, emițînd numai radiații...

Dezintegrarea protonului reprezintă o conversie masă-energie mult mai eficientă decît fisiunea sau fuziunea. În fuziunea hidrogenului, pentru a obține heliu se eliberează mai puțin de 1% din masa protonului ca energie, pe cînd procesul de dezintegrare a protonului produce o conversie de 100%!

Dispariția bruscă a unui proton, și deci a unui atom, este însă un eveniment extrem de rar; altfel ar fi fost detectat de mult. De fapt, este de așteptat ca astfel de evenimente să fie rarisime, deoarece foarte rar particulele elementare ajung să se apropie la o asemenea distanță încît să poată avea loc

schimbul de bosoni lepto-quark X. Fizicianul A. Salam a estimat că viața unui proton este de circa 10^{31} de ani.

Evident, nimeni nu-și poate imagina că pentru a verifica această predicție ar trebui așteptat 10^{31} de ani spre a observa dezintegrarea unui proton... Pentru orientarea se amintește că vîrsta Universului este apreciată la abia 10^{19} ani. Oricum însă, căutarea unei dezintegrări a protonului nu este fără speranțe. Anume, o vîrstă medie de 10^{31} ani implică faptul că într-o cantitate de 10^{31} protoni poate fi observată cîte o dezintegrare pe an! Practic, în 1 000 t de substanță există circa $5 \cdot 10^{32}$ protoni și neutroni, astfel că, dintre aceștia, anual ar fi probabil să se dezintegreze circa 50.

De aici a derivat strategia detectării evenimentelor care violează legea conservării numărului barionic: să se urmărească cele 1 000 t de substanță timp de mai mulți ani și să se distingă dezintegrările protonilor și neutronilor de celelalte evenimente.

Perioada de 10^{31} de ani are calitatea de a fi „liniștitoare". Dacă evenimentul ar avea o perioadă mult mai mică, lumea din jur ar fi „radioactivă", iar stabilitatea materiei, așa cum este cunoscută în prezent, ar fi discutabilă...

Dezintegrarea protonului. Teoria de etalonare $SU(5)$, considerată actual ca un model standard, a adus pe un plan prioritar problema dezintegrării protonului. Fizicienii experimentatori au primit provocarea teoreticienilor, mai ales și pentru faptul că niciodată nu a existat o certitudine asupra „nemuririi protonului". De pildă, după cea mai simplă schemă, un proton s-ar putea dezintegra într-un pozitron și o pereche de neutrini, și nici o lege generală sau fundamentală nu ar fi violată! Se pare că nu este nimic în natură care să prevină acest proces; pe de altă parte însă nici nu a fost observat.

Teoria asigură scheme de o eventuală descompunere a protonului, la toate cele trei „nivele". O posibilitate ar fi că protonul se poate dezintegra emițînd un pozitron și un pion neutru (prin „ajutorul" dat de un boson X, cu o viață extrem de scurtă). Apoi, pionul se descompune în doi fotoni, care în schimb produc fiecare cîte o pereche electron-pozitron. Medierea bosonului X este consistentă cu simetria $SU(5)$.

Faptul că bosonul X are o masă estimată la 10^{15} GeV/c^2 ar putea duce la concluzia că este violată legea conservării energiei, prin aceea că un proton cu o masă mai mică, de circa 1 GeV/c^2, ar da naștere la o particulă intermediară cu o masă mult mai mare. Dar există o explicație. Potrivit teoriei, starea intermediară, în care are loc „inter-

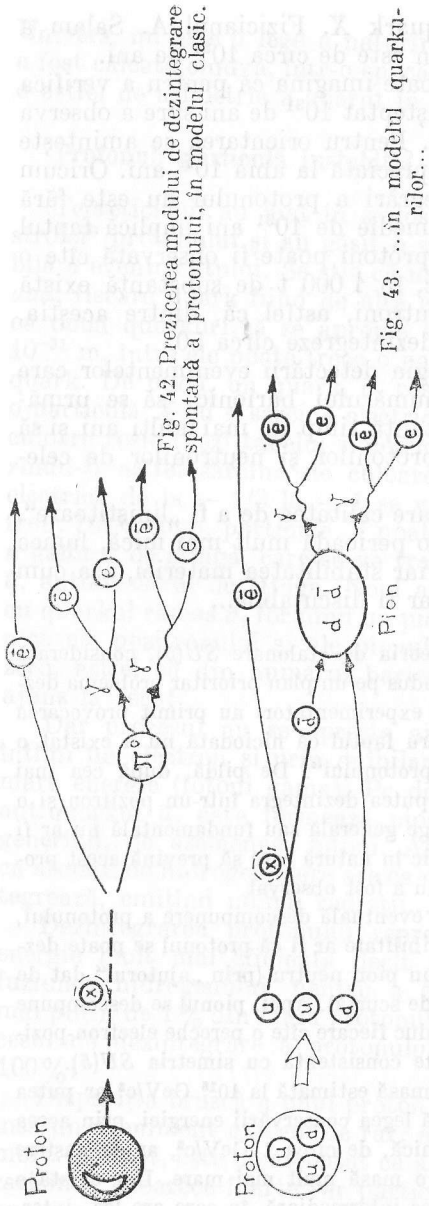


Fig. 42. Prezicerea modului de dezintegrare spontană a protonului, în modelul clasic.

Fig. 43. ...în modelul quarkurilor...

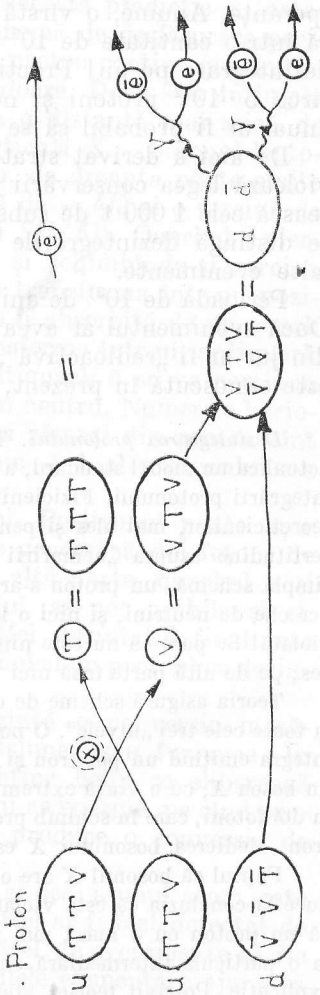


Fig. 44. ...și în modelul rishonilor.

venția" bosonului X, are o viață atît de scurtă încît nu poate fi detectată nici chiar în principiu; din punct de vedere al observației *ea nu există*... și legea este conservată.

În orice caz, chiar dacă masa mare a stării intermediare nu interzice dezintegrarea protonului, ea diminuează mult probabilitatea evenimentului. În orice moment dat, este foarte puțin probabil ca un proton să emită o particulă cu masa de 10^{15} GeV/c^2. Din această probabilitate mică rezultă viața extrem de lungă a protonului.

La nivelul quarkurilor, schema dezintegrării protonului (de compoziție *uud*) ar putea fi explicată astfel: interacția dintre două quarkuri u mediată de bosonul X are ca produse pozitronul și antiquarkul $\bar{d}$, apoi $\bar{d}$ se combină cu quarkul d rămas din componența protonului, dînd dubletul $d\bar{d}$ sau pionul neutru. Apoi continuă ca în schema anterioară.

Chiar și modelul rishonilor poate explica logic dezintegrarea protonului.

Între cele două quarkuri u se face schimb de rishoni T și ν. Rezultă quarkul TTT, care este pozitronul. Apoi, antiquarkul $\bar{\nu}\bar{T}\bar{\nu}(\bar{d})$ se combină cu quarkul $\nu T\nu$ (d) și rezultă mezonul $d\bar{d}$ adică, pionul neutru, care se dezintegrează ca mai sus.

În căutarea evenimentului, fizicienii au recurs la metode cu totul diferite de cele ale celor mai multe experimente din fizica particulelor subnucleare. Schimbarea este atît de radicală, încît experimentatorii și-au propus să procedeze exact invers! Adică, în loc de a bombarda detectoarele cu fascicule de energii înalte, ei depun mari eforturi pentru a feri aparatura de orice radiații care ar putea-o ajunge. Corespunzător acestor orientări, uriașe instalații de detectare au fost așezate sub pămînt, în tunele și mine.

Dintre experimentele făcute, destul de multe, se pare că o primă evidență ar fi avut loc în 1977, într-o mină din sudul Africii potrivit căreia s-a adus o corecție a timpului de viață al protonului: 10^{29} de ani. Rezultatul experimentului prezintă însă un mare grad de incertitudine.

Un alt experiment a fost făcut într-o mină de sare, la peste 600 m sub pămînt, lîngă Cleveland (S.U.A.). Instalația avea în componența ei un număr de 2 048 fotomultiplicatori, care au fost suspendați într-un bazin cu 8 000 t apă. Experimentatorii au așteptat trei ani, pînă în iulie 1982, ca fotomultiplicatorii să semnaleze evenimentul de dezintegrare a unui proton. Potrivit estimărilor teoriei $SU(5)$, se așteaptă ca din cei 10^{33} protoni pe care îi conține volumul de apă, cel puțin 20 de protoni ar trebui să se dezintegreze în fiecare an.

Pînă în prezent nici un astfel de eveniment nu a fost confirmat și situația sugerează că teoria $SU(5)$ va necesita modificări. Oricum, datele obținute pînă în prezent semnalează o corecție pentru viața medie a protonului: $1{,}2 \cdot 10^{32}$ de ani, de asemenea liniștitoare...

Experimentatorii au recurs și la o altă metodă, care este nu numai practică, dar și ușoară. Se pornește de la ideea că dezintegrarea protonului constituie, de fapt, un fel de radioactivitate. În acest sens, procesul ar trebui să contribuie la fondul de radiații de pe suprafața Terrei. Apoi, fondul de radiații ar putea fi măsurat cu un contor Geiger-Müller sau alt contor similar. Dacă se va scădea din fondul de radiații contribuția unor surse cunoscute, restul ar fi datorat dezintegrării protonilor.

Cu acest procedeu, de „razie totală", a fost stabilit un model scăzut al vîrstei protonului — 10^{17} ani, adică de 10 milioane de ori vîrsta actuală a Universului.

Trebuie însă reținut că pînă în prezent *nu a fost dovedită experimental dezintegrarea protonului.* O vină poate reveni și instalațiilor, insuficient izolate. Au avut loc evenimente datorate intrării în zonă a miuonilor, a neutrinilor și altor particule, care alertau inutil aparatele. După eliminarea interferențelor, doar cîteva evenimente au reținut atenția. Dar nici unul nu s-a dovedit a fi în caracteristica de aranjament „spate-la-spate". (Calculele arată că pozitronul și pionul emiși de proton în procesul de dezintegrare ar trebui să aibă sensuri opuse, adică să fie înregistrați „spate-la-spate" față de proton.)

Rezultatele negative nu elimină complet alte scheme pentru unificarea forțelor naturii. Există cîteva versiuni ale teoriei „marii unificări" bazate pe grupuri matematice mai complicate decît $SU(5)$, care rămîn consistente cu datele experimentale, mai întîi deoarece astfel de versiuni nu au posibilitățile de a face orice predicții cantitative despre viața protonului. Mai mult, chiar dacă grupul de specialiști au examinat circa 30 de căi posibile de dezintegrare a protonului, mai rămîne posibil că există alte canale rămase încă nedetectate, ori că datele colectate vor putea totuși să fie interpretate ca o dezintegrare a protonului.

Ideea nu este însă părăsită și întrebarea: se dezintegrează protonul? — este încă în atenția cercetătorilor. S-ar putea ca viața protonului să fie mult mai mare decît cea prezisă de teoria $SU(5)$, deci peste capacitățile detectoarelor folosite.

Poate perfecționarea instalațiilor, mărirea eșantioanelor și eliminarea perturbațiilor produse de neutrini (care străbat cu ușurință Terra!) vor putea face lumină într-o zi și cercetătorii vor putea da un răspuns categoric: da sau nu.

Energia necesară pentru a crea particule X reale este peste puterile tehnicii prezentului, chiar și peste puterile forțelor din Universul actual. Nicăieri în Univers nu pot fi create astfel de energii uriașe. Într-o eră mai timpurie a Universului însă, s-ar fi putut ca particulele X să fie ceva obișnuit. Anume, se apreciază că la 10^{-40} s după „Marea explozie" dimensiunea Universului ar fi fost comparabilă cu scara

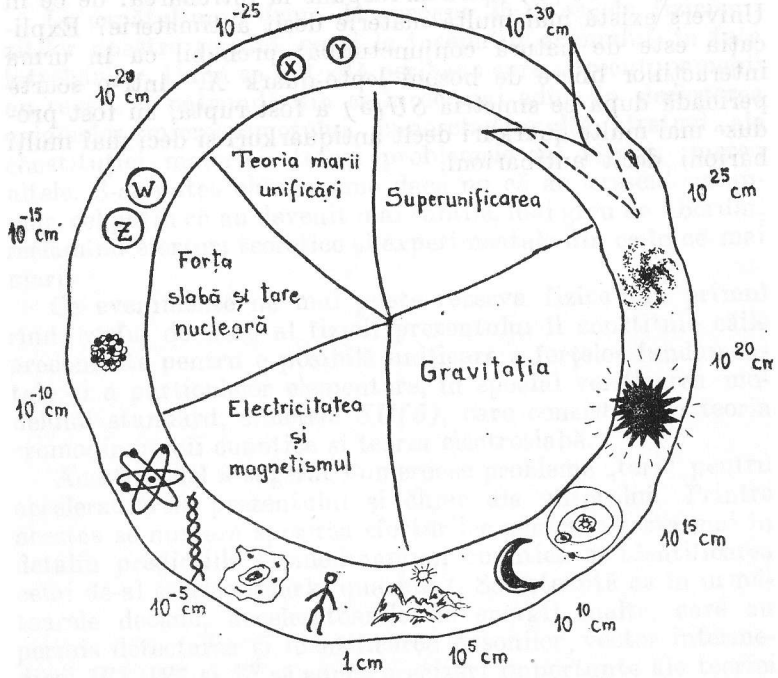


Fig. 45. Șarpele lui Glashow. Fizicianul S. Glashow combină un vechi simbol al Universului, șarpele, cu forțele fundamentale și distanțele caracteristice la care acționează. De la distanțele cosmice la cele planetare domnește gravitația. De la dimensiunile omului la cele atomice domină electromagnetismul. În interiorul atomului stăpînesc forțele nucleare: tare și slabă. Cu cît distanțele descresc, iar energiile cresc, ultimele trei forțe devin echivalente (teoria „marii unificări"); iar apoi va fi inclusă și gravitația, semnificată prin șarpele care își înghite coada — superunificarea.

„marii unificări". Universul ar fi fost atunci atît de fierbinte (10^{18}K) încît toate particulele au avut energii la nivelul particulelor *X*. Atunci era doar o singură forță, cu un singur fel de materie, ca apoi, o dată cu creșterea distanței, să înceapă ruperea simetriei și încetarea conversiilor leptoni-quarkuri. Universul de azi ar fi doar o rămășiță a acelor procese fierbinți...

Dacă cele prezentate mai sus sînt corecte, atunci teoria de unificare *SU(5)* oferă un răspuns la întrebarea: de ce în Univers există mai multă materie decît antimaterie? Explicația este de natură conjuncturală: probabil ca în urma interacțiilor libere de bosoni lepto-quark *X*, într-o scurtă perioadă după ce simetria *SU(5)* a fost ruptă, au fost produse mai multe quarkuri decît antiquarkuri și deci mai mulți barioni decît antibarioni.

PROBLEME DESCHISE

În fața întrebărilor

La capătul unui drum de aproape 25 de secole, fizicienii zilelor noastre se află, ca și la începutul drumului, în fața întrebărilor. După ce în toată perioada care a trecut, oamenii au reușit să pătrundă din ce în ce mai adînc în dezlegarea enigmelor microcosmosului, cunoscînd multe straturi ale constituției materiei, totuși problemele au rămas, mereu altele. S-ar putea chiar spune dacă nu că au crescut ca număr, cel puțin că au devenit mai subtile, mai greu de abordat, reclamînd eforturi teoretice și experimentale din ce în ce mai mari.

Ce evenimente ne mai poate rezerva fizica? În primul rînd, vîrful de atac al fizicii prezentului îl constituie căile preconizate pentru o posibilă unificare a forțelor fundamentale și a particulelor elementare, în special verificarea modelului standard, simetria *SU(5)*, care consistă din teoria cromodinamicii cuantice și teoria electroslabă.

Acest model a sugerat numeroase probleme „tari" pentru acceleratoarele prezentului și chiar ale viitorului. Printre acestea se numără sporirea eforturilor pentru a testa mai în detaliu predicțiile cromodinamicii cuantice și identificarea celui de-al șaselea quark, quarkul *t*. Se așteaptă ca în următoarele decade, acceleratoarele de energii înalte, care au permis detectarea și identificarea bosonilor vector intermediari W^+, W^- și Z^0 să aducă precizări importante ale teoriei electroslabe. În orice caz, pentru a obține rezultate notabile, va trebui ca acceleratoarele să atingă energii de ordinul teraelectron-volților.

Cu toate că modelul standard este lipsit de inconsistență într-o măsură remarcabilă, el mai este și incomplet; mai are nevoie de unele „îmbunătățiri". De pildă, modelul nu dă nici o explicație pentru organizarea maselor quarkurilor și leptonilor sau pentru faptul că deși tranzițiile respectă liniile despărțitoare ale familiilor, *totuși uneori le trece*. Dar

chiar și organizarea în familii cere explicații. De ce există trei „seturi" de quarkuri și leptoni? Oare nu cumva sînt chiar mai multe?

În același context, emisia de leptoni etalează o serie de enigme în lumea fenomenelor subnucleare. Valorile de energie disponibile pentru emisie sînt aici mult mai mari decît cele din tranzițiile nucleare. Uneori, atunci cînd energia disponibilă este suficient de mare pentru emisie leptonică, „electronul" emis în perechea de leptoni are o masă care este

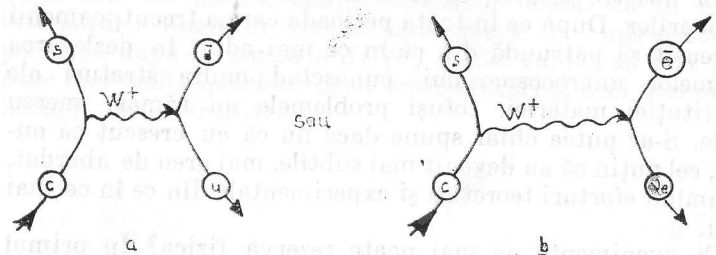


Fig. 46. Dezintegrarea spontană a unui quark *c* într-un quark *s* și membri ai primei generații: a) *u* și $\bar{d}$; b) $\bar{e}$ și ν_e.

de 200 de ori mai mare decît cea a unui electron obișnuit. Acest electron „greu", numit și miuon, diferă de cel obișnuit doar prin faptul că are o masă mai mare.

Neutrinul însoțitor al miuonului are și el o ciudățenie: nu este același tip de neutrin care însoțește electronul „ușor". Deși are, de asemenea, o masă de repaus neglijabilă, el poate fi foarte clar deosebit de neutrinul obișnuit.

Apoi, în 1975 a fost anunțată descoperirea electronului „supergreu", numit taon. Noul lepton are o masă de 1,8 TeV/c^2 — de două ori cît masa protonului și de 3 600 de ori cît masa electronului. Taonului îi este asociat un neutrin de un tip diferit de ceilalți doi cunoscuți — neutrinul taonic (încă neidentificat experimental). Cu excepția masei, taonul este similar electronului și miuonului.

Miuonul și taonul sînt particule instabile. Ele se transformă spontan în cîte o pereche obișnuită de leptoni (electron + neutrinul electronului), plus cîte un neutrin specific fiecăreia: neutrin miuonic, respectiv neutrin taonic.

Oare, nu cumva toți cei trei „electroni" și cei trei „neutrini" sînt stări cuantice ale unei particule, avînd în vedere că între ei pot avea loc tranziții? Dar aceasta ar putea fi o indicație că atît electronii cît și neutrinii ar putea avea o structură internă! Oricum însă aceasta ar fi o problemă fundamentală, întrucît ar fi intim legată de natura sarcinii electrice, care joacă un rol fundamental în natură.

Faptul că fiecărei perechi de leptoni îi corespunde o pereche de quarkuri sugerează imediat ideea că între leptoni și quarkuri trebuie să existe o simetrie. Modelul standard prevede chiar posibilitatea transformărilor lepton-quark și reciproc.

Monopolii magnetici

Fizica modernă este pătrunsă de ideea simetriei. Totuși există o asimetrie „bătătoare la ochi", o asimetrie atît de evidentă încît nu este deloc justificată neatenția cu care este tratată. Anume, se știe că sarcina electrică apare sub forma de multipli ai unei sarcini fixe (sarcina electronului). Electricitatea și magnetismul sînt atît de strîns legate și, în ciuda acestei relații, nimic nu poate fi observat în natură ca un analog magnetic al unui singur fel de sarcină electrică. Polii magnetici apar totdeauna pereche — fiecare magnet are un pol nord și un pol sud. Teoreticienii au emis ideea că ar putea exista izolat un pol nord sau un pol sud, și un astfel de obiect a fost numit *monopol magnetic*.

Interesul serios pentru monopolul magnetic a început în anul 1931, cînd P.A.M. Dirac a prezis existența unei particule încărcate magnetic, pentru a explica cuantizarea observată a sarcinii electrice. El a arătat că doar multiplii întregi ai unei sarcini magnetice fundamentale, g (numită sarcina Dirac), prezintă consistență cu mecanica cuantică.

Existența monopolilor magnetici este prezisă de cele mai multe versiuni ale teoriilor marii unificări, printre care și teoria standard *SU(5)*. O astfel de particulă nu are sarcină electrică și îi este asociată o singură sarcină magnetică.

Părerile teoreticienilor diferă asupra structurii interne a monopolului magnetic, cît și asupra densității lui în Univers. Oricum, toți sînt de acord că monopolul magnetic posedă o masă enormă pentru o particulă elementară, probabil 10^{16} GeV/c^2, adică de 10^{16} —10^{17} ori masa protonului!

O astfel de particulă nu ar putea fi creată, în prezent, în nici un punct al Universului. Se apreciază că doar în primele 10^{-35} secunde după „Marea explozie" din care a apărut Universul, densitatea energiei ar fi fost suficient de mare pentru a permite unor particule cu astfel de masă să se materializeze liber. Dacă monopolii magnetici există, atunci ei trebuie să fie „relicve" ale acestei epoci...

În anul 1981, Valeri Rubikov, de la Institutul de cercetări nucleare din Moscova, precum și alți fizicieni (S. Adler, J. Bell și R. Jackiw) au emis ipoteza că monopolul magnetic poate cataliza dezintegrarea protonului. Proprietățile catalitice ale monopolului magnetic par să fie o consecință a structurii sale interne stabile.

Potrivit teoriei standard a marii unificări, monopolul magnetic este un *soliton*, adică un nod sau o deformare multidimensională în cîmpul forțelor de unificare, care erau prezente peste tot în Univers după nașterea sa. Pe măsură ce Universul devenea mai rece din cauza expansiunii, cîmpurile forțelor de unificare au dispărut peste tot, cu excepția modurilor monopolare. Știind că orice cîmp de forțe este generat prin schimb de bosoni vector, care mediază forța, monopolul magnetic ar putea fi imaginat ca un agregat format din circa 100 bosoni vector asociați forței de unificare. Adică, în interiorul monpolilor magnetici ar fi un „jar" fierbinte care „poartă focul" Universului timpuriu. Dacă un astfel de „nod" de bosoni vector trece pe lîngă un proton, atunci protonul va fi supus forței de unificare și se va dezintegra instantaneu...

Alți fizicieni consideră un mod de catalizare diferit, bazîndu-se pe predicțiile teoriilor de unificare, care atribuie monopolului magnetic dimensiuni incredibil de mici — de 10^{14} ori mai mic decît protonul, în ciuda masei sale enorme. Ei au adoptat ipoteza că monopolul magnetic interacționează tare cu protonul (și îi produce dezintegrarea) la nivelul cîmpului magnetic. Monopolul ar rămîne intact după interacție și poate continua să catalizeze dezintegrarea altor protoni.

Interacția monopolilor magnetici cu protonul este doar o posibilitate teoretică; pînă în prezent nu au fost observate experimental nici monopolul magnetic, nici dezintegrarea protonului. Fără îndoială însă, considerațiile teoretice au

deschis un cîmp larg experimentatorilor pentru detectarea acestei particule exotice.

Monopolul magnetic este căutat la nivelul Pămîntului, în Cosmos (cu ajutorul laboratoarelor spațiale) și în observații astronomice asupra stelelor neutronice. O astfel de observație asupra stelei neutronice catalogată 1929 + 10 a apreciat că ar putea exista un flux de 10^{-21} monopoli magnetici pe centimetrul pătrat, pe an, adică un monopol pe an, pe o zonă de circa 600 km^2. Dacă fluxul de monopoli magnetici are într-adevăr această valoare, atunci ar produce dezintegrarea protonului într-o asemenea măsură încît în 10^{18} ani Pămîntul s-ar evapora!...

Cercetările continuă cu detectori moderni, foarte sensibili, care folosesc tehnici supraconductoare. Aceștia măsoară direct numai sarcina magnetică, independent de ceilalți parametri.

Modelul standard în fața criticii

Se pare că simplificarea nu este o trăsătură specifică etapei actuale a fizicii particulelor. Cea mai mare parte a cercetătorilor a acceptat modelul standard *SU(5)* ca o aproximare reușită a tabloului microcosmosului și o bună bază de studiu. Dar pentru a specifica complet modelul standard este nevoie de peste 20 de parametri și constante neprevăzute de teorie. Acestea includ intensitatea de cuplaj a interacțiilor tari, slabe și electromagnetice, masele quarkurilor și leptonilor și parametrii specificînd interacțiile bosonului Higgs. Apoi, constituenții aparent fundamentali și particulele mediatoare de forță sînt în număr de cel puțin 37: quarkuri sînt 18 (șase tipuri, fiecare în cîte trei culori), 6 leptoni, fotonul, 8 gluoni, 3 bosoni vector intermediari și postulatul boson Higgs.

Se observă ușor că sub aspectul simplității modelul standard nu pare să reprezinte un progres prea mare față de imaginea antică asupra materiei — făcută din pămînt, aer, foc și apă (interacționînd prin simpatie și repulsie...). Dar încurajați de precedente istorice mulți fizicieni explică marea diversitate, presupunînd că toate particulele așa-zise fundamentale sînt constituite din particule mai mici, în diverse

combinații. Între acestea se numără și modelele preonilor și rishonilor, prezentate anterior.

O altă deficiență de bază a modelului standard se referă la bosonul Higgs. Mecanismul Higgs a fost adoptat pentru renormalizarea teoriei. Printr-un astfel de mecanism, toate elementele care perturbă teoria ar putea fi absorbite într-o redefinire a parametrilor fizici ca masa și constanta de cuplaj. Descoperirea bosonului Higgs este un test important al posibilităților de renormalizare.

Bosonul Higgs este preconizat ca o particulă singulară, H^0, a cărei masă, încă necunoscută, este apreciată teoretic în limitele 10—1 000 GeV/c^2. În contrast cu incertitudinile asupra masei, felul de cuplaj al bosonului Higgs cu alte particule este bine determinat. El urmează să se dezintegreze, cu precădere, în perechi de fermioni de cea mai mare masă permisă sub aspect energetic. De pildă, un boson Higgs cu masa de 20 GeV/c^2 se presupune că se va dezintegra în special într-o pereche de quarkuri $b\bar{b}$ (quarkul b are masa de circa 4,6 GeV/c^2). Deoarece quarkul b are o viață relativ lungă (10^{-12}s) există posibilitatea de a detecta perechea $b\bar{b}$ prin urmele lăsate în procesul de dezintegrare și apoi să se deducă masa bosonului Higgs, din studiul energiei și momentului perechii $b\bar{b}$.

Cuplarea bosonului Higgs cu alte particule este considerată slabă, făcînd ca produsul unei astfel de stări să fie extrem de rar. Singurele cuplaje considerate posibile ar fi cu particulele grele, ca, de pildă, quarkul t (încă neidentificat) și bosonii W și Z. O astfel de „sursă" posibilă pentru punerea în evidență a bosonului Higgs ar fi dezintegrarea unei stări legate de quarkuri $t\bar{t}$ *(toponiu)*, într-un boson Higgs și un foton.

Calculele au mers mai departe, preconizînd că dacă masa H^0 ar fi de circa 10 GeV/c^2, iar masa quarkului t de 30 GeV/c^2, toponiul se va dezintegra pe această schemă circa 1% din timpul său de dezintegrare. Iar la un viitor accelerator, cu energia fasciculelor electron-pozitron astfel potrivite încît să se acordeze pe rezonanța toponiului, energia monocromatică emisă de foton în această dezintegrare ar putea fi o mică semnătură pentru vînătoarea lui H^0...

O altă sursă promițătoare de bosoni Higgs este radiația unui boson Z^0, o dată cu dezintegrarea ambilor într-o pereche

de quarkuri de viață mai lungă. Această configurație de stare finală, cu patru particule de viață lungă, din care două ar putea determina masa bosonului Higgs, furnizează un semnal cel puțin spectaculos.

Printre enigmele anului 1984 se numără și descoperirea unei noi particule. Faptul i-a pus pe fizicienii teoreticieni în situația unui mecanic care constată că după asamblarea unei mașini i-a rămas o piesă în plus. Este vorba de particula *zeta*, a cărei existență *nu este prevăzută de teorie!* De aceea, descoperirea sa și omologarea acestui statut ar putea semnifica schimbări în concepțiile actuale asupra stării materiei. E. Bloom (de la SLAC-Stanford) și H. Bienlein (de la DESY-Hamburg) au condus grupul care a descoperit particula zeta, în cursul unor cercetări asupra dezintegrării mezonilor y-psilon. În unele cazuri, dezintegrarea mezonilor y-psilon (care au o masă de circa 9,5 GeV/c^2) produce un foton cu energia de circa 1,1 GeV și o jerbă de alte particule ce par să fie produsele de dezintegrare ale unui „partener" al fotonului. Acest „partener", a cărui masă a fost estimată la circa 8,3 GeV/c^2, este considerat a fi particula zeta.

S-a sugerat că zeta ar putea fi bosonul Higgs, dar caracteristicile noii particule nu se potrivesc exact cu cele prevăzute pentru Higgs-on. Oricum, mai trebuie făcute cercetări pentru a stabili semnificația lui zeta.

De aici începe partea dificilă. Doar perfecționările tehnicilor experimentale pentru identificarea particulelor grele (taonul și quarkurile c, b și t), precum și realizarea de acceleratoare cu energii mai mari ar putea face posibilă detecția acestei particule eluzive, H^0, care joacă un rol critic în teoria unificării.

Enigma gravitației

În fine, pe agenda problemelor deschise a fizicienilor, poate cea mai dificilă este cea a gravitației: dacă ea va putea fi inclusă într-un model de unificare a forțelor fundamentale sau nu.

Includerea gravitației în teoria marii unificări pune, de asemenea, probleme deosebite, din cauză că pentru a pune în evidență acțiunea forței gravitaționale sînt necesare concencentrări de energie foarte mari. Dar mai există și alte probleme cu forța gravitațională: nu a fost elaborată o teorie

cuantică a gravitației, teoria lui Einstein fiind totuși o teorie clasică, legată de conceptele de bază și timp.

Vreme de peste 30 de ani, Einstein a încercat să unifice gravitația cu electromagnetismul, folosind metoda sa de abordare clasică, dar nu a ajuns la nici un rezultat.

Fizicienii s-au asociat în jurul mai multor idei. Unii, mai radicali, doresc să reconstruiască din temelii mecanica cuantică și teoria gravitației; alții însă încearcă să modifice prin aproximări succesive cele două teorii.

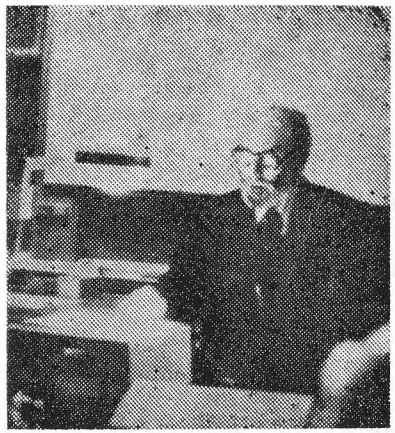
S. Glashow avea să declare, în 1975: „Sîntem cu toții de acord să abandonăm deocamdată orice speranță de a include gravitația în teorie. Deși o sinteză finală va corecta această omisiune de moment noi credem că avem azi un model coerent al particulelor elementare fără gravitație și că acest model este destul de precis la energii suficient de joase".

Dar acest „conservatorism" avea să fie încetul cu încetul „săpat" de noi idei ale fizicienilor, care nu au renunțat să încerce totuși să includă forța gravitațională în schema celorlalte forțe fundamentale ale naturii. Astfel, și gravitația ar putea fi descrisă ca o teorie de etalonare, în care purtătorii forței gravitaționale, numiți *gravitoni*, ar avea o masă practic nulă, ca și cea a fotonilor forței electromagnetice. Gravitonii ar fi extrem de rapizi, ceea ce ar explica raza infinită de acțiune a gravitației. Potrivit calculelor, gravitonul ar avea spinul 2, adică se rotește de 4 ori mai rapid decît electronul (care are spinul 1/2). Dar din cauză că în calculul intensității forței gravitaționale există singularități (este guvernată de legi încă necunoscute), pînă în prezent nu a putut fi elaborată o teorie de etalonare a gravitației.

Totuși, au fost realizate cîteva succese în încercările de a lega teoria gravitației de cea a particulelor elementare. De pildă, S. Hawking a preconizat teoretic că gravitația puternică poate crea particule elementare. Însă cum gravitația puternică ar fi cam de nivelul întîlnit într-o „black hole", ipoteza sa va fi greu de verificat.

Un alt grup de cercetători, reprezentat de Abdul Salam, a elaborat o teorie a supergravitației, prin care postulează unificarea particulelor de spin 1/2 cu particulele de spin

Abdul Salam



întreg (fermionii cu bosonii), prin intermediul unei superparticule numită *gravitino*, de spin 3/2. Prin intermediul unui gravitino ar fi posibilă trecerea de la graviton la foton, care, la rîndul său, poate crea perechi de leptoni (electron-pozitron). Adică, se ajunge tot la ipoteza lui S. Hawking.

Chiar dacă se va reuși elaborarea unei „superteorii" de etalonare generalizată, care să includă și aspectele forței gravitaționale, aceasta va avea soluții simetrice doar în regiunea energiilor foarte înalte, întocmai ca și teoria standard *SU(5)*. În acest caz, toate forțele fundamentale sînt egale între ele, fiind doar „fețe" ale unei forțe universale unificatoare. Pe măsură ce energiile se apropie de valori normale, apar ruperi de simetrie succesive, care duc, în final, la raportul de forțe observat de fizica experimentală contemporană.

O presupusă agendă de lucru

Încercînd o sistematizare a cîtorva dintre cele mai interesante subiecte care sînt probabile pe lista de așteptare a experimentelor ce urmează să se facă în acceleratoarele majore ale timpului nostru, probabil că fizicienii se vor concentra asupra următoarelor puncte.

1. Cunoașterea mai în detaliu a bosonilor vector intermediari W^+, W^- și Z^0;

2. Detectarea și identificarea quarkului t;

3. Detectarea jeturilor și a stărilor produse de gluoni (gluoniul sau glubolii);

4. Detectarea unor particule compuse din quarkurile b și c;

5. Studierea proprietăților neutrinului taonic (încă neidentificat) și oscilațiile neutrinilor;

6. Studierea leptonilor grei (miuonul și taonul);

7. Testarea în continuare a cromodinamicii cuantice;

8. Detectarea și identificarea bosonilor Higgs;

9. Studierea jerbelor de radiații cosmice de mare energie, de 10^2 TeV sau mai mari, care conțin o enigmatică lipsă de pioni neutri și se crede că aceasta reprezintă un nou fenomen fizic;

10. Detectarea unor particule asociate teoriilor *tehnicolor* și *supersimetrice*, două teorii care prezic existența unor întregi întregi familii de stări ale particulelor elementare;

11. Studii de împrăștiere a leptonilor pe protoni; bucurîndu-se de structura lor punctiformă și imunitate față de forța de culoare, leptonii pot penetra adînc în proton, aduf

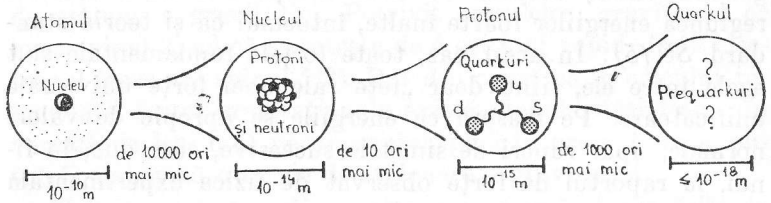


Fig. 47. Cascada particulelor elementare.

cînd informații asupra distribuției quarkurilor în interiorul protonului.

Lista, bineînțeles, poate continua și poate fi schimbată oricînd. Nimeni nu poate anticipa exact fizica de mîine. Istoria a arătat că de cele mai multe ori, cele mai mari descoperiri se petrec în zone ce nu au fost incluse în rațiunile care au cerut în primul rînd construcții de acceleratoare.

Pe de altă parte, unele pronosticuri au fost superb confirmate. De pildă, teoria electroslabă a prezis bosonul vector intermediar W cu o masă de circa 83 GeV/c^2, iar experiența a confirmat strălucit această previziune.

Între timp, fizicienii se frămîntă neobosit să elaboreze noi teorii de unificare, mai complexe decît „naiva" *SU(5)*. Noile teorii au fost botezate cu o diversitate de nume, printre care „supersimetrică" sau „tehnicoloră". În plus, introduc o serie de alte probleme, printre care proliferarea altor particule cu nume mult mai „șocante": fotini, sleptoni, goldstini, tehnipioni, squarkuri, Weyl Higgini de stînga, gluini, zinoni și chiar... winoni...

Dar, oare, ce fel de energii trebuie atinse în instalațiile de accelerare pentru a putea face lumină în toate problemele fundamentale menționate? Susținătorii teoriilor „marii unificări" apreciază că problemele din jurul bosonilor Higgs sînt prioritare, deoarece pe aceste particule se bazează întreaga strategie a unificării. Deci ei ar trebui să constituie ținta folositoare a următoarei generații de acceleratoare.

Despre bosonul Higgs, care, după cum se vede, a ajuns o „stea" de primă mărime, s-a emis ipoteza că nu ar fi o particulă elementară, ci mai degrabă un agregat compus din constituenți elementari analogi quarkurilor și leptonilor, dar care s-ar supune unui nou tip de interacții tari, deseori numită *forță tehnicolor*, care îi va confina într-o zonă cu dimensiunea de 10^{-19} m. Fenomenul care ar putea evidenția o astfel de interacție ar necesita o energie de circa 1 TeV (o mie de miliarde de electron-volți)!

O altă cale de apropiere în problema masei și comportării bosonilor Higgs folosește principiul menționat mai sus, cunoscut sub numele de „supersimetrie". Supersimetria, care asigură relații între particulele ce diferă în spin, postulează existența unui întreg set de particule, care ar fi corespondentele gemene ale quarkurilor, leptonilor și bosonilor cunoscuți, dar vor diferi ca spin și ca masă.

Teoria care cuprinde ideile supersimetriei a început să fie exploatată sistematic prin experimente. Astfel, în urma descoperirii bosonilor vector intermediari W^+, W^- și Z^0, în

1983, o echipă de cercetători de la acceleratorul PETRA (R.F.G.) au căutat dovada existenței gemenilor acestor bosoni. Făcînd cîteva considerații despre dezintegrarea produșilor gemenilor, investigatorii *nu au găsit nici o dovadă concludentă pentru particulele supersimetrice.* Mai precis, rezultatele au mplicat faptul că dacă astfel de particule există, masele lor ar trebui să fie destul de mari, fără a le depăși însă pe cele ale bosonilor W și Z. Astfel, gemenul lui Z^0 se presupune că va avea masa de circa 35 GeV/c^2, iar gemenii bosonilor W vor avea masa de cel puțin 25 GeV/c^2.

Nu se pot încă prevedea consecințele punerii în evidență a particulelor supersimetrice. Cercetările continuă...

Teoria superstringurilor. De cele mai multe ori este nevoie de un timp îndelungat între elaborarea ideilor teoretice elegante și predicția formulată precis, care să poată fi verificată experimental. De pildă, au fost necesari 13 ani pentru a găsi căile corecte de aplicare a teoriilor de calibrare nonabeliene privind unificarea forțelor fundamentale ale naturii. Și munca încă nu s-a terminat. Ceea ce lipsește acestei unificări este forța de gravitație. Deci este natural să se pună întrebarea dacă nu cumva teoriile care au fost numite ale „Marii unificări" ar putea fi unite cu gravitația, printr-o teorie care să se bazeze pe mai multe dimensiuni.

Astfel, unii cercetători au considerat că una din dificultățile de a include gravitația în modelele cunoscute pleacă de la o premisă de bază a teoriei cuantice a cîmpului, anume că gravitonii și toate celelalte particule sînt descrise ca puncte matematice, fără dimensiuni.

Încă din anul 1947, fizicienii Joël Scherk și John Schwarz au propus ipoteza că particulele elementare nu sînt puncte, ci, mai degrabă, *curbe unidimensionale*, pe care le-au numit *stringuri* (în l. engleză *string* = coardă, filament etc.). Adică, stringurile nu ar avea grosime, iar lungimea lor ar depinde de circumstanțe. În orice caz, valoarea tipică a stringurilor ar fi *lungimea Planck* (10^{-35} m), o lungime inimaginabil de mică. Dacă ar fi să facem o comparație, lungimea

Planck este atît de mică față de atom cît este atomul față de sistemul solar.

Pe aceste entități a fost elaborată o nouă teorie, cunoscută sub numele de *teoria superstringurilor*, care statuează că Universul nu are numai trei dimensiuni, ci nouă! S-ar părea că ideea frizează domeniul SF, dar este fără îndoială o posibilitate sensibilă în contextul teoriei cuantice a superstringurilor.

Ce aduce nou teoria multidimensională a superstringurilor? În primul rînd ea îi eliberează pe fizicieni de unele din absurditățile pe care le-au impus abordările convenționale. În esență, noua teorie le permite fizicienilor să facă mai puține presupuneri arbitrare cînd se caută răspunsuri la unele probleme de bază. Din acest motiv, și din cauza căilor noi pe care le deschide, în prezent noua teorie a captat interesul unora dintre cei mai reprezentativi fizicieni.

Variantele de teorii superstring se bucură în prezent de o mare popularitate pentru faptul că ele pot fi folosite să descrie toate fenomenele fundamentale ale naturii. Aparent pare să fie aproape imposibil să se construiască o teorie cuantică a gravitației, consistentă matematic, fără a folosi conceptul de stringuri. Sau invers, pare imposibil să se construiască o teorie a superstringurilor consistentă matematic, fără a include gravitația.

Pentru ca teoriile superstring să fie consistente, este necesar ca celor trei dimensiuni cunoscute să li se mai adauge (potrivit unei variante propuse de J. Schwerz și colab.) șase dimensiuni suplimentare. Ideea de bază este că cele 6 dimensiuni suplimentare nu pot fi deosebite, fiind prea mici. Ele se consideră a fi „înfășurate" într-un fel de „ghem" 9-dimensional, care poate să existe în toate punctele din continuul spațiu-timp. Se presupune că toate cele 9 dimensiuni au fost odată egale, la nașterea Universului, dar în momentele următoare, trei dintre ele s-au extins, lăsîndu-le pe celelalte „înfășurate". Dimensiunile suplimentare ar fi aparente doar la scara stringurilor (10^{-35}m)

Stringurile au nevoie de cîteva explicații. Astfel, se definesc două tipuri: stringul deschis, care este o curbă cu capetele libere, și stringul închis, care este o curbă închisă (o buclă). Stringurile au cîteva comportări interesante. În pri-

mul rînd ele se deplasează prin oscilații. Maniera în care oscilează un string determină tipul de particulă elementară pe care o reprezintă. Adică, oscilînd într-un anume fel, un string poate fi, de pildă, o particulă materială (electron sau quark) ori un purtător de forță (foton sau Z^0). În al doilea rînd, stringurile se pot asocia sau divide, operații care reprezintă interacții; din două stringuri, prin asociere, se formează un alt string, iar dintr-un string, prin diviziune, se formează două stringuri. Aceste interacții ar sta la baza tuturor forțelor fundamentale și ar reprezenta singura forță din care derivă gravitația, electromagnetismul, forțele nucleare tare și slabă, precum și eventuale alte forțe încă neidentificate.

Se poate observa ușor că acest cuplaj de bază al stringurilor — asocierea și diviziunea — înlocuiește un număr infinit de posibile interacții care pot produce forțe în teoriile cuantice anterioare ale gravitației.

În felul acesta a fost dată o explicație matematică consistentă unică a tuturor forțelor fundamentale din natură. Conceptul stringurilor nu numai că propune o singură particulă, care prin variații poate să reprezinte toate miriadele de particule ale lumii subnucleare, dar, de asemenea, propune o singură sursă pentru toate forțele naturii.

Teoriile string sînt legate de ideile fizicianului T.F.E. Kaluza care, în 1919, a propus suplimentarea celor patru dimensiuni ale continuului spațiu-timp cu încă o dimensiune. Scopul său a fost să dea o formă de unificare a forțelor naturii cunoscute pe acea vreme. Pe atunci erau cunoscute doar două forțe fundamentale: gravitația, care era descrisă de teoria generală a relativității, și electromagnetismul, care era descris, în principal, de teoria lui J.C. Maxwell. Evident, cele două forțe apăreau profund diferite. De pildă, toate particulele elementare cunoscute se supuneau gravitației, dar, în schimb, numai cele care posedau sarcină electrică ascultau de legile electromagnetismului.

Prima încercare de unificare a celor două forțe fundamentale, aparent distincte, a făcut-o fizicianul suedez Gunnar Nordström, în 1914, arătînd că ambele pot fi deduse dintr-o formă 5-dimensională a electromagnetismului. Ideea lui Nordström a fost însă abandonată, deoarece nu putea explica curbura razelor de lumină care trec prin apropierea Soarelui. Apoi a intervenit Kaluza, arătînd că ambele forțe fundamentale pot fi deduse dintr-o versiune 5-dimensională a teoriei generale a relativității. Întrucît descrierea lui Kaluza a adoptat forma de abordare a teoriei generale a relativității, el a trimis materialul lui A. Einstein, solicitînd o recomandare pentru a-l publica. La timpul respectiv, un astfel de articol putea fi publicat doar cu recomandarea unui fizician bine cunoscut. Einstein a răspuns, sugerînd că unele părți ale teoriei ar mai trebui studiate înainte de publicare. Abia după doi ani și jumătate,

Einstein s-a răzgîndit și a recomandat publicarea articolului lui Kaluza, în anul 1921.

Evident, pe timpul publicării, teoria lui Klauza a fost „frustrată" de o serie de fenomene importante descoperite ulterior.

Ideea a fost reluată în 1926, de fizicianul suedez Oskar Klein, care a elaborat o versiune a ecuației lui Schrödinger, cu 5 variabile (în loc de 4 variabile cum are versiunea originală), arătînd că soluțiile ecuației pot fi interpretate ca unde care se propagă în cîmpurile gravitaționale și electromagnetice ale continuului spațiu-timp 4-dimensional obișnuit; iar în mecanica cuantică, undele pot fi interpretate ca particule.

Pentru a marca paternitatea ideeii, toate teoriile cuantice care vizează unificarea forțelor fundamentale ale naturii în spațiul cu mai multe dimensiuni, mai sînt numite *teorii Kaluza-Klein*.

Au fost și alte încercări de perfecționare, dar prima versiune modernă a apărut la începutul anilor '70, pentru a explica unele aspecte ale interacțiilor tari. Una dintre problemele teoriilor timpurii a fost că particulele și forțele deductibile din ecuațiile respective nu semănau cu nimic din lumea de atunci, față de cea pe care o cunoaștem azi. De aceea nu au fost interesante pentru fizicienii acelor ani, care le socoteau prea speculative.

Unele dintre noile versiuni, perfecționate, ale teoriei superstringurilor, fac predicții pe care fizicienii contemporani le știu ca exacte: că există patru forțe în natură, că există quarkuri, electroni, protoni etc.

Este un domeniu de avînt pentru microfizică, dar pentru mulți fizicieni este încă o temă foarte nouă și trebuie un oarecare timp de „acomodare".

Visul lui Einstein a fost să demonstreze că gravitația și celelalte forțe din natură sînt una și aceeași, dar el niciodată nu s-a putut împăca cu natura probabilistă a mecanicii cuantice. Or, teoria superstringurilor nu numai că *permite* forțelor, particulelor și mecanicii cuantice să fie unite, ci chiar o *cere*.

În contextul teoriei stringurilor, în anul 1971 a apărut o teorie a superstringurilor, în care un element de bază este conceptul numit supersimetrie, susținută de P. Ramond, A. Neveu și J. Schwarz. Independent și aproape în același timp, teoria a fost introdusă de fizicienii sovietici J.A. Golfand și E.P. Lihtman, pentru particule punctiforme în spațiul tridimensional. Ulterior, teoria a fost dezvoltată prin lucrările altor fizicieni din care pot fi menționați: J. Wess, B. Zumiro, S. Ferara, D. Freedman, P. van Nieuwenhuizen ș.a.

După cum s-a mai menționat, noțiunea de simetrie este unul dintre cele mai folositoare instrumente ale fizicianului. Conceptul de simetrie este util în dezvoltarea teoriilor de calibrare deoarece poate marca similitudini între obiecte extrem de diferite. Or, acest lucru este deosebit de important, deoarece obiecte care diferă foarte mult între ele pot avea simili-

tudini ascunse surprinzătoare. Iar de multe ori natura observabilă „sparge" simetriile. De pildă, ecuațiile care descriu forța magnetică tratează toate direcțiile în același fel, dar forța asociată unui magnet fizic totdeauna indică unele direcții particulare. Astfel, simetria ecuațiilor nu este reflectată într-un magnet fizic.

În aceeași manieră, toate cele 9 dimensiuni ale spațiului sînt matematic echivalente — adică ecuațiile care le privesc prezintă simetrie —, dar, în lumea observabilă, trei dintre ele sînt mult mai mari decît celelalte șase. Același lucru este valabil și pentru forțele din natură: toate au aceeași intensitate la nivele energetice sau temperaturi extrem de înalte, dar etalează diferențe enorme în condițiile normal observabile.

În fizica particulelor elementare, simetria este un concept prin care două particule subatomice pot fi, matematic, schimbate între ele. Aceste particule sînt însă grupate în două clase: fermionii și bosonii. După cum se știe, fermionii includ leptonii și quarkurile, iar bosonii includ particulele de calibrare și diferă de fermioni prin spin.

Pînă în primii ani ai deceniului '70, în aplicarea simetriei la studiul fenomenelor în fizică, totdeauna fizicienii au considerat transformările simetrice ca legînd fie bosoni cu bosoni, fie fermioni cu fermioni. Apoi au apărut teorii mai „curajoase", prin care s-a sugerat că pot exista simetrii care să lege bosoni cu fermioni și viceversa. Din cauza proprietăților lor remarcabile, cît și pentru a le deosebi de simetriile obișnuite, aceste simetrii au fost numite *supersimetrii.*

Potrivit supersimetriei, teoria prezice direct că fiecare boson și fermion trebuie să aibă un partener printre clasa opusă a particulelor subatomice. Dar care fermion se potrivește cu care boson? O primă presupunere ar fi că particulele de calibrare (bosonii) ar trebui să fie partenerii supersimetrici ai fermionilor, dar presupunerea nu se potrivește: particulele nu pot fi „asociate" chiar așa de simplu. Astfel că este necesar să se postuleze existența unor noi particule, care să servească drept parteneri pentru fiecare particulă cunoscută.

Ipoteticii parteneri fermionici ai particulelor de calibrare (particule *gauge)* au primit numele generic de *gauginos*, cu specificări ale numelor pentru diversele cazuri. De pildă,

partenerul fotonului este numit *fotin.* Partenerii bosonici ai quarkurilor și leptonilor sînt numiți, respectiv, *squarkuri* și *sleptoni.* Partenerul electronului este *selectronul. Gravitinul* este partenerul supersimetric al gravitonului, particule de calibrare purtătoare a forței de gravitație. Desigur, acest *slimbaj* nu este privit cu prea multă simpatie de fizicieni...

În anul 1984, M. Green și J. Schwarz, după cinci ani de muncă laborioasă, au descoperit că există două versiuni ale supersimetriei în spațiul 9-dimensional, care pot învinge anumite inconsistențe pe care le prezintă mecanica cuantică.

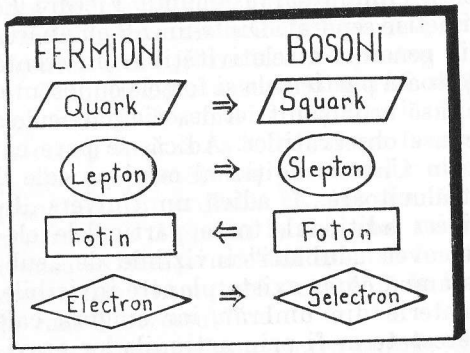


Fig. 48. Lumea paralelă a fermionilor și bosonilor, preconizată de teoria supersimetriei.

Cele două grupuri de simetrie sînt numite, în limbaj matematic, $SO(32)$ și $E8 \times E8$.

Detalierile făcute celor două simetrii, $SO(32)$ și $E8 \times E8$, care stau la baza a două teorii superstring, au creat mare agitație în lumea științei. Prin formulările fizicienilor D. Gross, J. Harver, E. Martinec și R. Rohn, de la Universitatea Princeton (S.U.A.), s-a demonstrat că cele două simetrii, printr-o unificare consistentă cu gravitația, pot rezolva multe din ambiguitățile care au fost o plagă pentru teoria cuantică a cîmpului. Cele două grupuri nu numai că sînt determinate, dar tot așa este și spectrul complet al particulelor elementare, toate interacțiile lor și chiar dimensionalitatea spațiului și timpului.

Desigur, mai sînt necesare eforturi mari pentru a pune de acord teoriile superstringurilor cu fenomenele observate în laboratoare. Oricum, fenomenologia superstringurilor progresează rapid, iar perspectivele acestor teorii — în special pentru simetria $E8 \times E8$ — apar extrem de promițătoare. Un pas crucial este de a deduce o descriere geometrică detaliată a celor șase dimensiuni compacte, acel „ghem" de stringuri. Acest efort atinge frontierele matematicii și succesul va duce la un nivel de comunicare fără precedent între fizicieni și matematicieni.

Teoria $E8 \times E8$ (E înseamnă grup de excepție, iar 8 este o notație tehnică) are cîteva implicații fascinante. Fiecare $E8$ identifică un grup de simetrie separat. Dintr-un $E8$ au apărut „ca prin minune" teoria generală a relativității — în esență gravitația —, precum și toate particulele și forțele cunoscute. Al doilea grup $E8$ este însă neobișnuit: el descrie particulele și forțele care sînt ascunse observațiilor. Adică, se pare că, în principiu, ar exista un Univers adițional celui pe care îl cunoaștem (cu stele strălucitoare...), adică un Univers „în umbră". În acest Univers adițional, toate particulele elementare observabile ar avea „dubluri" invizibile de „substanță din umbră". Înseamnă că ar exista planete invizibile, stele și galaxii din „materie din umbră", iar singura cale prin care ar putea fi detectate ar fi prin acțiunile lor gravitaționale, respectiv efecte asupra mișcării stelelor, prin curbarea razelor de lumină care trec prin apropierea unei galaxii invizibile.

Astrofizicienii știu de mult că ar trebui să existe mai multe tipuri de materie întunecată, invizibilă; numai astfel s-ar putea justifica anumite proprietăți observate ale galaxiilor. Anume, studiind mișcarea de rotație a galaxiilor s-a observat că stelele de la periferie se mișcă mai repede decît o cere legea gravitației, ca și cum galaxia ar fi un corp rigid în loc de o aglomerare de stele. Se sugerează astfel existența materiei „din umbră", invizibile. Or, materia asociată cu al doilea grup $E8$ ar putea să fie unul din principalii constituenți ai acestui Univers „din umbră"...

Teoria superstringurilor este pe cale să intre într-o perioadă de experiențe și confirmări. Oamenii de știință lucrează intens pentru a verifica efectele prezise de teorie.

Unele lucruri vor fi însă aproape imposibil de testat. De pildă, existența celor șase dimensiuni suplimentare ar putea fi demonstrată prin experimente în care coliziunile de particule la mari energii produc noi tipuri de particule, cu proprietăți specifice. Din nefericire, dimensiunile suplimentare sînt probabil atît de mici încît energia cerută pentru a le explora este cu mult peste ceea ce va fi disponibil în viitorul previzibil...

Dar cercetătorii speră că unele lucruri vor putea fi totuși confirmate sau infirmate. Deși nu există rațiuni pentru a crede că masele particulelor „dubluri" ar putea fi observate în „coliderele" prezentului sau chiar viitoare, totuși urmele ușoare ale unor astfel de particule, în experimente recente, sînt „chinuitoare" pentru fizicieni.

O confirmare a supersimetriei ar fi una dintre cele mai importante descoperiri din istoria fizicii moderne. De mult fizicienii visează că într-o zi vor fi în stare să înțeleagă masa și alte proprietăți ale particulelor elementare, pornind de la principii primordiale. Ei sînt dornici să înțeleagă structura spațiului și timpului la cele mai mici distanțe și să afle rațiunea existenței acestui spectru foarte larg de lungimi fundamentale din natură, începînd de la lungimea Planck pînă la raza Universului.

S-ar putea ca una dintre șansele fizicienilor de „a-și vedea visul cu ochii" o reprezintă perfecționarea teoriei superstringurilor...

Pentru a putea face față încercărilor „grele" care le așteaptă, acceleratoarele viitorului vor trebui să se bazeze pe tehnici supraconductoare, spre a putea genera uriașele cîmpuri magnetice necesare ridicării la ordinul teraelectron-voltilor a energiei fasciculelor de particule destinate coliziunilor. Realizările din ultima decadă au adus rezultate „infernal" de apropiate pentru o înțelegere profundă a constituenților fundamentali ai naturii și a interacțiilor lor. Teoriile prezentului sugerează că frontiera ignoranței actuale va cădea la energii de circa 1 TeV și se va putea găsi cheia marii unificări a forțelor naturii.

Vor reuși oare fizicienii să dovedească experimental tot ce se preconizează teoretic? Dacă nu se poate da un răspuns direct acestei întrebări, mai apropiată pare presupunerea că

fiecare etapă nouă în cercetare, pe lîngă verificarea unor ipoteze teoretice, va arăta și lucruri noi care, la rîndul lor, vor stimula elaborarea unor noi teorii, și așa mai departe...

Fizicianul V. Weisskopf sintetizează astfel studiul naturii: „Noi, fizicienii, simțim nevoia să ne adîncim în structura materiei pentru a descoperi legile supreme care guvernează materia și proprietățile ei. Ceea ce se întîmplă este că găsim mereu noi fenomene. Nu am reușit încă să găsim legile fundamentale ale naturii. Am avut însă succes în a descoperi noi forme de comportament a naturii, ceea ce este, poate, o realizare la fel de minunată; de fapt, ea este chiar mai romantică decît celălalt scop, deoarece cu cît sîntem mai adînc în materie, cu atît natura este mai stranie".

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

Banciu, A.S., *Din istoria descoperirii elementelor chimice*. Edit. Albatros, București, 1981.

Banciu, A.S., *Descoperiri epocale în chimie*. Edit. Albatros, București 1984.

Creţu, T.I. și Tudorache, Șt. Șt., *Fizica atomului*. Edit. Științifică și Enciclopedică, București, 1985.

Feynman, R.P., *Fizica modernă*, vol. I—III. Edit. Tehnică, București, 1971—1972.

Halliday, D. și Resnick, R., *Fizică*, vol. I—II. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1975.

Huțanu, Gh., *Efecte fundamentale în fizică*. Edit. Albatros, București, 1975.

Fiuciue, N., *Particule elementare*. Edit. Științifică și Enciclopedică, Bucureşti, 1976.

Fiuciue, N., *În lumea atomului*. Edit. Albatros, București, 1984.

Guțul-Văluță, M. și Mandravel, C., *Structura electronică a atomilor*. Edit. Albatros, București, 1986.

Iordănescu, A., *Fuziunea termonucleară controlată*. Edit. Albatros, București, 1982.

Mandravel, C. și Guțul-Văluță, M., *Sistemul periodic al elementelor*. Edit. Albatros, București, 1982.

Moisil, G., *Cui i-e frică de fizica modernă?* Edit. Albatros, București, 1981.

Moisil, G., *Cascada modelelor în fizică*. Edit. Albatros, București, 1985.

Sears, F.W., Zemansky, R.W. și Young, H.D., *Fizica*. Edit. Didactică și Pedagogică, București, 1983.

Sterian, P. *Introducere în teoria relativității și noțiuni de teoria gravitației*. Edit. Tehnică, București, 1979.

Todoran, I., *Cît mai aproape de stele*. Edit. Dacia, Clui-Napoca, 1977.

Ursu, I., *Energia atomică*. Editura Științifică, București, 1973.

Vasiliu, E., *Lumina — undă sau corpuscul?* Edit. Albatros, București, 1976.

Vasiliu, E., *Electronul — corpuscul sau undă?* Edit. Albatros, București, 1978.
Weinberg, S., *Primele trei minute ale Universului.* Editura Politică, București, 1985.
Wichmann, H.E., *Fizica cuantică.* Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
Colecțiile revistelor:
— Studii și cercetări de fizică
— Revista de fizică și chimie
— Știință și tehnică
— Znanie Sila
— Nauka i jizni
— Science et Vie
— Science '85, '86
— Nature
— Scientific American

CUPRINS

SCURTĂ INTRODUCERE 5

Capitolul 1
CE ESTE SUBSTANȚA?
La început au fost filozofii 6
O sistematizare genială 10
Lege chimică stabilită de un jurist 14
Măsurători în microcosmos 19

Capitolul 2
CONTURAREA UNEI LUMI ATOMICE
Electronul pe cîntar 21
Un model timid 24
O activitate tăcută: radioactivitatea 27
Un bombardament pașnic 31
Un model planetar 33

Capitolul 3
ATOMUL ȘI-A ASIGURAT FIZICA PROPRIE
Un mic impas 37
O piatră de hotar: teoria cuantelor 41
Un model care place 42
Principiul de corespondență: un compromis? 47
Îmbunătățiri: probabilitate și spin 48
Discriminare în microcosmos: principiul excluziunii 53
O dispută celebră: Newton și Huygens 56
Teribila dilemă: undă sau corpuscul? 58
Concepții noi: mecanica matriceală și principiul de nedeterminare 64
Bohr intervine din nou: principiul de complementaritate 68

Capitolul 4
RADIOACTIVITATEA ȘI TRANSMUTAȚIILE
O proliferare neașteptată: izotopii 72

Legea deplasării și transmutațiile 74
Radioactivitate și probabilitate 76

Capitolul 5
DETECTARE ȘI IDENTIFICARE
Trecerea particulelor prin substanță 82
Fotonii și substanța 84
Probleme tehnice 87
Semnăturile particulelor elementare 94
Perfecționări: camera cu bule și simulatorul electronic 100

Capitolul 6
NUCLEUL
Din nou despre măsurători 104
Visul alchimiștilor: transmutația elementelor 107
O nouă particulă: neutronul 110
Jocul nucleonilor și defectul de masă 114
Un musafir din Cosmos: pozitronul 116
Forțele nucleare 121
Cîteva modele 122
O particulă ipotetică: neutrinul 126
Particule reale și particule virtuale 131

Capitolul 7
RADIOACTIVITATEA ARTIFICIALĂ
Un fenomen descoperit de două ori? 138
Fermi și neutronii-proiectil 142
Surprizele neutronilor 145

Capitolul 8
ACCELERATOARE
Problema energiilor mari 151
O clasificare simplă 154
Inelele de stocare — o perfecționare remarcabilă 159
Giganții și rudele mai mici 162
Planuri de viitor 167

Capitolul 9
ENERGIA NUCLEARĂ
Defectul de masă — sursă modernă de energie 169
Reacția în lanț 172

Reactorul nuclear 174
Industria atomică 177
Un proces atrăgător 181
Fuziunea controlată — deocamdată un vis frumos 183
Speranțele de viitor 186

Capitolul 10
PARTICULE ELEMENTARE
Statutul de elementaritate 188
Spinul 190
Intervine statistica 193

Capitolul 11
COMPLICAȚIILE MICROCOSMOSULUI
Încep surprizele 195
Interacțiile și stranietatea 198
Rezonanțe 200
Stranietate dublă și legile de conservare 201
Simetria în natură 203
O apariție neașteptată: neutrinul miuonic 208
Sarcină electrică și sarcină barionică 209
Stabilitatea protonului — în discuție 212
Antimateria 213
Încercări de sistematizare 219

Capitolul 12
MODELUL QUARKURILOR
O sistematizare elegantă 225
Quarkurile 229
Barionii și quarkurile 232
Mezonii și quarkurile 233
Prima dovadă a existenței quarkurilor 235
Situația se complică din nou 236
Alertă în lumea leptonilor 239
Alți candidați în lumea quarkurilor 240
Scurtă privire asupra sistematizării 241
Quarkurile și culoarea 245
Forța de culoare 248
Structura quarkurilor? 255
Un model interesant: rishonii 259
Cercetările continuă 260

Capitolul 13
MAREA UNIFICARE A FORŢELOR FUNDAMENTALE ŞI A PARTICULELOR ELEMENTARE
Interacţia tare 263
Forţa gravitaţională şi forţa electromagnetică.... 267
Forţa slabă 268
Teoriile de etalonare şi unificarea electroslabă.... 270
O descoperire spectaculoasă: bosonii vector intermediari 275
Drumul spre „Marea unificare“..... 278
Simetriile de etalonare şi cromodinamica cuantică 283
Simetria forţei slabe 286
Simetria electroslabă 287
Simetria standard a „marii unificări“..... 290
Protonul: particulă instabilă? 294

Capitolul 14
PROBLEME DESCHISE
În faţa întrebărilor..... 301
Monopolii magnetici 303
Modelul standard în faţa criticii..... 305
Enigma gravitaţiei 307
O presupusă agendă de lucru..... 309
— Bibliografie selectivă 321

ÎN ATENŢIA CITITORILOR

La p. 145, r.17, în loc de vV se va citi eV.
La p. 186, r.16, în loc de *confirmare* se va citi *confinare.*
La p. 186, r.18, în loc de *cofinare* se va citi *confinare.*
La p. 225, r.1, în loc de 10 se va citi 12.
La p. 254, r.23, în loc de referente se va citi recente.